

# МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 9 (114)

сентябрь

2010

**Редакционный совет:**

КУЗНЕЦОВ Н. А.  
МАКАРОВ И. М.  
МАТВЕЕНКО А. М.  
ПЕШЕХОНОВ В. Г.  
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.  
ФЕДОРОВ И. Б.

**Главный редактор:**

ТЕРЯЕВ Е. Д.

**Заместители гл. редактора:**

ПОДУРАЕВ Ю. В.  
ПУТОВ В. В.  
ЮЩЕНКО А. С.

**Выпускающий редактор:**

ФИЛИМОНОВ Н. Б.

**Ответственный секретарь:**

ПЕТРИН К. В.

**Редакционная коллегия:**

АЛЕКСАНДРОВ В. В.  
АНТОНОВ Б. И.  
АРШАНСКИЙ М. М.  
БОГАЧЕВ Ю. П.  
БУКОВ В. Н.  
ВОСТРИКОВ А. С.  
ГРАДЕЦКИЙ В. Г.  
ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.  
ИВЧЕНКО В. Д.  
ИЛЬЯСОВ Б. Г.  
КАЛЯЕВ И. А.  
КОЛОСОВ О. С.  
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.  
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.  
КУЗЬМИН Н. Н.  
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.  
ЛЕОНОВ Г. А.  
ЛЁВИН Б. А.  
ЛОХИН В. М.  
НОРЕНКОВ И. П.  
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.  
РАПОПОРТ Э. Я.  
РАССАДКИН Ю. И.  
РАЧКОВ М. Ю.  
РЕЗЧИКОВ А. Ф.  
СЕБРЯКОВ Г. Г.  
СИГОВ А. С.  
СИРОТКИН О. С.  
СОЙФЕР В. А.  
ТИМОФЕЕВ А. В.  
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.  
ФУРСОВ В. А.  
ХИМЕНКО В. И.  
ЮРЕВИЧ Е. И.  
ЮСУПОВ Р. М.

**Редакция:**

БЕЗМЕНОВА М. Ю.  
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.  
ЧУГУНОВА А. В.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Цыкунов А. М.** Робастное управление одним классом неминимально-фазовых объектов с компенсацией ограниченных возмущений . . . . . 2
- Чебурахин И. Ф., Цурков В. И.** Специальная реляционная база данных для оптимизации и автоматизации синтеза комбинационных автоматов . . . . . 7
- Алиев Т. А., Мусаева Н. Ф., Гулуев Г. А., Саттарова У. Э.** Помехотехнологии индикации и идентификации скрытого периода перехода объекта из нормального в аварийное состояние. . . . . 13

### К 80-летию МГТУ "СТАНКИН": АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

- Логинов А. В., Подураев Ю. В., Харцбекер К., Иленфельдт Ш.** Оптимизация динамических свойств многокоординатных обрабатывающих центров с гибридной кинематической структурой . . . . . 19
- Клевалин В. А., Поливанов А. Ю.** Системы технического зрения в промышленной робототехнике. . . . . 26
- Евстафиева С. В., Молодцов В. В.** Моделирование следящего привода подачи современных станков с ЧПУ . . . . . 37
- Ермолов И. Л., Никитин В. Н., Собольников С. А.** Интерактивный тренажер для операторов мобильных роботов с элементами актуальной адаптации. . . . . 45
- Заруднев А. С., Илюхин Ю. В.** Повышение производительности лазерных комплексов на основе прогноза контурной ошибки . . . . . 52
- Дунин-Барковский И. И., Подураев Ю. В.** Современные оптомехатронные системы для трехмерного оптического контроля объектов. . . . . 57
- Грибков А. А.** Повышение точности и производительности автоматизированных систем весового порционного дозирования материалов . . . . . 61

### РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Мурсалимов Э. Ш.** Особенности использования программной среды "Matlab" для визуального моделирования движений многозвенных манипуляторов . . . . . 66
- Зенкевич С. Л., Назарова А. В.** Оценка параметра по информации от нескольких датчиков . . . . . 71
- Яшунский В. Д.** Разработка и исследование алгоритмов обработки изображения для системы технического зрения на основе фокусировки . . . . . 74
- Contents.** . . . . . 79

*Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования*

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:  
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: [mech@novtex.ru](mailto:mech@novtex.ru)

УДК 519.7

**А. М. Цыкунов**, д-р техн. наук, проф.,  
Астраханский государственный  
технический университет,  
tsykunov\_al@mail.ru

## Робастное управление одним классом неминимально-фазовых объектов с компенсацией ограниченных возмущений

*Решается задача проектирования алгоритмического обеспечения робастной системы управления для неминимально-фазового объекта, подверженного действию внешних возмущений. Выделен класс объектов, для которых предложен принцип построения системы управления, компенсирующей параметрические и внешние ограниченные возмущения с требуемой точностью.*

**Ключевые слова:** робастное управление, неминимально-фазовый объект, полиномиальное уравнение, задающее возмущение, параметрические и внешние возмущения

**Введение.** Одной из основных проблем теории управления является проектирование алгоритмического обеспечения регулирующих устройств в условиях априорной неопределенности параметров математических моделей объектов и при наличии внешних неизмеряемых возмущений. В таких условиях проектируемая система управления должна обеспечивать выполнение основной цели, например, стабилизацию регулируемой переменной, что возможно осуществить, если скомпенсировать влияние на нее параметрических и внешних возмущений.

Впервые на возможность создания систем управления, не чувствительных к внешним возмущениям, было указано в [1]. Впоследствии такие системы были названы инвариантными [2]. По этой проблеме имеется большое число публикаций. Достаточно полно эта проблема изложена в [3], где приводится классификация задач проектирования инвариантных систем управления и различных типов возмущений.

Выделяются два основных принципа построения систем управления, позволяющих достичь выполнения основных целевых условий при наличии параметрических и внешних возмущений. В инвариантных системах структура и параметры управляющего устройства выбираются таким образом, чтобы обеспечить полную или частичную нечув-

ствительность системы к нежелательным различным воздействиям. Другой принцип построения основан на динамической компенсации возмущений, когда с помощью формирования соответствующим образом управляющего воздействия осуществляется подавление влияния возмущений на систему. В настоящее время системы, обеспечивающие выполнение перечисленных выше условий, стали называть робастными, и разработано большое число способов проектирования таких систем. Теория построения таких систем и обширная библиография приведены в [4].

К системам, в которых осуществляется компенсация возмущений, следует отнести управляющие устройства, использующие внутреннюю модель возмущений [5, 6], оценку производных неизмеряемых сигналов [7, 8], идентификацию гармонических воздействий с последующей компенсацией [9, 10], метод вспомогательного контура [11–14], позволяющий выделить сигналы, несущие информацию о возмущениях, метод инвариантных эллипсоидов [15]. Во всех работах, за исключением [9], исследуются минимально-фазовые модели объектов управления.

Проблема компенсации параметрических и внешних возмущений для произвольных неминимально-фазовых объектов, в которых вектор состояния не измеряется, пока еще ждет решения.

Однако существуют математические модели неминимально-фазовых объектов, для которых, при определенных структурных ограничениях, эту задачу можно решить. В данной статье выделяется класс неминимально-фазовых объектов, структурные ограничения на его математическую модель и предлагается принцип построения робастной системы управления, компенсирующей параметрические и внешние ограниченные возмущения с требуемой точностью.

**Постановка задачи.** Рассмотрим объект управления, математическая модель которого имеет вид

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Df(t), \\ y_1(t) &= L_1x(t), \quad y_2(t) = L_2x(t),\end{aligned}\quad (1)$$

где  $x \in \mathbb{R}^n$  — вектор состояния;  $u \in \mathbb{R}$ ;  $y_1 \in \mathbb{R}$  — управляющее воздействие и регулируемая переменная;  $y_2 \in \mathbb{R}$  — измеряемая переменная;  $f(t)$  — внешнее ограниченное возмущение;  $A, B, D, L_1, L_2$  — числовые матрицы соответствующих порядков. Передаточная функция

$$W(\lambda) = L_1(\lambda I - A)^{-1}B = R(\lambda)/Q(\lambda)$$

является неминимально-фазовой, т. е. часть корней или все корни уравнения  $R(\lambda) = 0$  имеют положительные вещественные части, где  $\lambda$  — комплексная переменная в преобразовании Лапласа;  $I$  — единичная матрица соответствующего порядка;  $\deg R(\lambda) = m$ ,  $\deg Q(\lambda) = n$ ,  $Q(\lambda)$  — произвольный многочлен.

Требуется построить систему управления, обеспечивающую выполнение целевого условия

$$|y_1(t) - r| < \delta \text{ при } t > T, \quad (2)$$

где  $\delta > 0$ ;  $T$  — время, по истечении которого с начала работы системы должно выполняться целевое условие, характеризующее ошибку отработки задающего воздействия  $r$ , которое на промежутке времени  $\Delta t > T$  остается постоянной величиной.

Решить эту задачу можно, спроектировав систему управления для регулирования переменной  $y_1(t)$  по косвенным измерениям переменной  $y_2(t)$ . В данной статье предлагается иной подход, основанный на декомпозиции математической модели объекта управления.

Предполагается, что можно осуществить декомпозицию уравнения (1), в результате которой получается система уравнений

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= A_1 x_1(t) + B_1 y_2(t); \quad y_1(t) = C_1 x_1(t); \\ \dot{x}_2(t) &= A_2 x_2(t) + B_2 u(t) + K_2 x_1 + D_2 f(t); \\ y_2(t) &= C_2 x_2(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $x_1 \in \mathbb{R}^{n_1}$ ,  $x_2 \in \mathbb{R}^{n_2}$ ;  $n_1 + n_2 = n$ ;  $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, K_2, D_2$  — числовые матрицы соответствующих порядков. При такой декомпозиции первая система с передаточной функцией  $W_1(\lambda) = C_1(\lambda I - A_1)^{-1} B_1 = R_1(\lambda)/Q_1(\lambda)$  должна получиться неминимально-фазовой, а вторая подсистема с передаточной функцией  $W_2(\lambda) = C_2(\lambda I - A_2)^{-1} B_2 = R_2(\lambda)/Q_2(\lambda)$  — минимально-фазовой.

Рассмотрим простой пример такой декомпозиции. Математическая модель объекта описывается уравнением

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} 2 & 1 & -1 & 0 \\ 3 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 1 \\ -2 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} f(t); \\ y_1(t) &= [1 \ 0 \ 0 \ 0]x(t); \quad y_2(t) = [0 \ 0 \ 1 \ 0]x(t). \end{aligned}$$

Объект является неустойчивым и неминимально-фазовым, так как передаточная функция имеет

вид  $W(\lambda) = \frac{-2\lambda^2 + 3\lambda + 2}{\lambda^4 - \lambda^3 - 5\lambda^2 - 5\lambda + 7}$ . Нули имеют значения 2 и -0,5.

Проведем декомпозицию:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 3 & 0 \end{bmatrix} x_1(t) + \begin{bmatrix} -1 \\ 2 \end{bmatrix} y_2(t); \quad y_1(t) = [1 \ 0]x_1(t); \\ \dot{x}_2(t) &= \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x_2(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix} y_1(t) + \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} f(t); \\ y_2(t) &= [1 \ 0]x_2(t). \end{aligned}$$

В данном случае  $W_1(\lambda) = \frac{-\lambda + 2}{\lambda^2 - 2\lambda - 3}$ ,  $W_2(\lambda) = \frac{2\lambda + 1}{\lambda^2 - \lambda + 1}$ . Получились две подсистемы, одна из которых является неминимально-фазовой.

Предположим, что выполнены следующие ограничения.

*Предположения.*

1. Возможна декомпозиция уравнения (1), в результате которой получается система уравнений (3).

2. Пары  $(A_1, B_1)$ ,  $(A_2, B_2)$  — управляемы, а  $(A_1, C_1)$ ,  $(A_2, C_2)$  — наблюдаемы.

3. Элементы матриц  $A_2, B_2, C_2, D_2, K_2$  могут принимать значения из известного ограниченного множества возможных значений  $\Xi$ . Матрицы  $A_1, B_1, C_1$  известны.

4. Возмущение  $f(t)$  — ограниченная функция времени.

**Метод решения.** Решение сформулированной задачи состоит из двух этапов.

1. Будем считать, что переменная  $y_2(t)$  является управляющим воздействием для первой подсистемы. Определим алгоритм изменения этой переменной, который обеспечивает требуемое качество переходных процессов и обеспечивает выполнение целевого условия (2).

2. Найденный закон изменения  $y_2^*(t)$  будет являться задающим воздействием для второй подсистемы. Далее проектируется алгоритм управления  $u(t)$ , обеспечивающий близость переменных  $y_2(t)$  и  $y_2^*(t)$  с требуемой точностью, в результате получается двухуровневый алгоритм управления, который обеспечивает выполнение неравенства (2).

Первую задачу можно решить различными способами. Воспользуемся методом полиномиальных уравнений [16], для чего запишем первое уравнение (1) в преобразовании Лапласа относительно переменной  $y_1(t)$ :

$$Q_1(\lambda)y_1(\lambda) = R_1(\lambda)y_2^*(\lambda). \quad (4)$$

Здесь  $y_2^*(t)$  — переменная, для которой требуется определить закон изменения, чтобы выполнялось целевое условие (2). В соответствии с [16] управление  $y_2^*(t)$  пока в неопределенной форме в преобразовании Лапласа зададим в виде

$$y_2^*(\lambda) = -\frac{Q_1(\lambda)}{R_1(\lambda)} \frac{W_3(\lambda)}{1 - W_3(\lambda)} y_1(\lambda) + \beta(\lambda)r(\lambda), \quad (5)$$

где  $W_3(\lambda)$  — требуемая передаточная функция замкнутой системы. Передаточная функция  $\beta(\lambda)$  выбирается из условия равенства сигналов  $y_1(t)$ ,  $r$  в установившемся состоянии, а также служит для сглаживания задающего воздействия при переводе объекта управления с одного режима работы на другой. Ясно, что (5) — это не реализуемая формула, кроме того, полином  $R_1(\lambda)$  — не гурвицев. В [16] обосновано, как надо выбирать  $W_3(\lambda)$ , чтобы закон управления (5) был реализуем и обеспечивал требуемое качество переходных процессов. Проведем факторизацию полиномов  $Q_1(\lambda)$ ,  $R_1(\lambda)$ :

$$Q_1(\lambda) = Q_1^+(\lambda) Q_1^-(\lambda); R_1(\lambda) = R_1^+(\lambda) R_1^-(\lambda),$$

где  $Q_1^-(\lambda)$ ,  $R_1^-(\lambda)$  — гурвицевы полиномы, а все корни уравнений  $Q_1^+(\lambda) = 0$ ,  $R_1^+(\lambda) = 0$  находятся в правой полуплоскости. Тогда передаточная функция замкнутой системы  $W_3(\lambda)$  определяется из следующих соотношений:

$$W_3(\lambda) = \frac{R_1^+(\lambda)M(\lambda)}{G(\lambda)}; 1 - W_3(\lambda) = \frac{Q_1^+(\lambda)N(\lambda)}{G(\lambda)}, \quad (6)$$

которые гарантируют реализуемость уравнения (5) и грубость синтезированной системы, где  $G(\lambda)$  — характеристический многочлен замкнутой системы. Полиномы  $N(\lambda)$ ,  $M(\lambda)$  требуется определить. При этом их порядки  $n_N$ ,  $n_M$  должны удовлетворять условиям:

$$n_R + n_M \leq n_G, n_Q + n_N = n_G,$$

которые являются условиями реализуемости уравнения (6), где  $n_R = \deg R_1^+$ ,  $n_Q = \deg Q_1^+$ ,  $n_G = \deg G$ . Сложив уравнения (6), получим полиномиальное уравнение

$$Q_1^+(\lambda)M(\lambda) + R_1^+(\lambda)N(\lambda) = G(\lambda) \quad (7)$$

для определения коэффициентов многочленов  $N(\lambda)$ ,  $M(\lambda)$ .

Тогда уравнение (5) примет вид

$$y_2^*(\lambda) = -\frac{Q_1^-(\lambda)}{R_1^-(\lambda)} \frac{M(\lambda)}{N(\lambda)} y_1(\lambda) + \beta(\lambda)r(\lambda). \quad (8)$$

Следует отметить, что в уравнениях (6) вместо полиномов  $Q_1^+(\lambda)$ ,  $R_1^+(\lambda)$  можно использовать многочлены  $Q_1(\lambda)$ ,  $R_1(\lambda)$ . Тогда из (5) получим

$$y_2^*(\lambda) = -\frac{M(\lambda)}{N(\lambda)} y_1(\lambda) + \beta(\lambda)r(\lambda). \quad (9)$$

Таким образом, первая часть сформулированной задачи решена. Найденное значение  $y_2^*(t)$  будет служить задающим воздействием для второй подсистемы.

Для решения второй задачи преобразуем второе матричное уравнение (3) в уравнение типа вход-выход относительно переменных  $y_2(t)$ ,  $u(t)$ :

$$Q_2(P)y_2(t) = R_2(P)u(t) + \sum_{i=1}^{n_1} G_i(P)x_{1i}(t) + D_2(P)f(t). \quad (10)$$

Здесь  $P = d/dt$  — оператор дифференцирования;  $x_{1i}(t)$  —  $i$ -е компоненты вектора  $x_1(t)$ ;  $Q_2(P)$ ,  $R_2(P)$ ,  $G_i(P)$ ,  $D_2(P)$  — линейные дифференциальные операторы соответствующих порядков, которые получаются при преобразовании уравнения (3);  $\deg Q_2 = n_2$ ,  $\deg R_2 = m_2$ ,  $\gamma = n_2 - m_2$ . Используя известную методику [17], проведем параметризацию уравнения (10):

$$Q_m(P)y_2(t) = ku(t) + \frac{N_1(P)}{M_1(P)}u(t) + \frac{N_2(P)}{M_1(P)}y_2(t) + \frac{S(P)}{M_1(P)} \left( \sum_{i=1}^{n_1} G_i(P)x_{1i}(t) + D_2(P)f(t) \right),$$

где  $Q_m(\lambda)$ ,  $M_1(\lambda)$ ,  $S(\lambda)$  — гурвицевы полиномы, имеющие порядки  $\gamma$ ,  $n_2 - 1$ ,  $\gamma - 1$  соответственно;  $\deg N_1(\lambda) = n_2 - 2$ ,  $\deg N_2(\lambda) = n_2 - 1$ ;  $k$  — коэффициент при старшей производной оператора  $R_2(P)$ . Составим уравнение для ошибки  $e_1(t) = y_2(t) - y_2^*(t)$ :

$$Q_m(P)e_1(t) = ku(t) + \varphi(t). \quad (11)$$

Здесь вся неопределенность сконцентрирована в функции

$$\varphi(t) = \frac{N_1(P)}{M_1(P)}u(t) + \frac{N_2(P)}{M_1(P)}y_2(t) + \frac{S(P)}{M_1(P)} \left( \sum_{i=1}^{n_1} G_i(P)x_{1i}(t) + D_2(P)f(t) \right) - Q_m(P)y_2^*(t).$$

Воспользуемся результатами работы [13].

**Утверждение 1.** [13] Пусть выполнены условия предположений. Тогда для любого  $\delta_1 > 0$  существуют числа  $\mu_0$ ,  $T$ ,  $\alpha$  такие, что при  $\mu < \mu_0$  алгоритм управления

$$u(t) = -\alpha \frac{Q_m(P)}{(\mu P + 1)^\gamma - 1} e_1(t)$$

обеспечивает выполнение условия

$$|e_1(t)| < \delta_1 \text{ при } t > T. \spadesuit$$

Если выбрать число  $\delta_1$  из условия  $\delta_1 k_3 < \delta$ , где  $k_3$  — коэффициент усиления первой подсистемы, то будет выполнено целевое условие (2).

Окончательный результат можно сформулировать следующим образом.

**Утверждение 2.** Пусть выполнены условия предположений. Тогда для любого  $\delta > 0$  существу-

ют числа  $\mu_0$ ,  $T$ ,  $\alpha$  такие, что при  $\mu < \mu_0$  алгоритм управления

$$u(t) = -\alpha \frac{Q_m(P)}{(\mu P + 1)^{\gamma} - 1} (y_2(t) - y_2^*(t));$$

$$y_2^*(t) = -\frac{Q_1^-(P)}{R_1^-(P)} \frac{M(P)}{N(P)} y_1(P) + \beta(P)r \quad (12)$$

обеспечивает выполнение целевого условия (2). ♦

Для иллюстрации полученных результатов рассмотрим численный пример.

**Пример.** Предположим, что математическая модель объекта управления имеет вид

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -4 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 1 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} f(t);$$

$$y_1(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]x(t); \quad y_2(t) = [0 \ 0 \ 1 \ 0]x(t). \quad (13)$$

Класс неопределенности задан неравенствами:  $-5 \leq a_{ij} \leq 5$ ,  $i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$ ,  $1 \leq b_k \leq 3$ ,  $-1 \leq d_k \leq 2$ ,  $k = 1, 2$ ,  $|f(t)| \leq 4$ . Целевое условие задано неравенством (2). Проведем декомпозицию:

$$\dot{x}_1(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} x_1(t) + \begin{bmatrix} -1 \\ 4 \end{bmatrix} y_2(t);$$

$$y_1(t) = [1 \ 0]x_1(t);$$

$$\dot{x}_2(t) = \begin{bmatrix} a_{33} & 1 \\ a_{43} & 0 \end{bmatrix} x_2(t) + \begin{bmatrix} a_{31} & a_{32} \\ a_{41} & a_{42} \end{bmatrix} x_1(t) +$$

$$+ \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} f(t); \quad y_2(t) = [1 \ 0]x_2(t).$$

В данном случае  $W_1(\lambda) = \frac{\lambda - 4}{\lambda^2 - \lambda + 1}$ ,  $W_2(\lambda) = \frac{b_1\lambda + b_2}{\lambda^2 - a_{33}\lambda - a_{43}}$ . Первая подсистема неустойчива

и неминимально-фазовая. Вторая минимально-фазовая может быть как устойчивой, так и не устойчивой в зависимости от того, какие значения принимают коэффициенты  $a_{33}$ ,  $a_{43}$  из заданного класса неопределенности.

Решаем первую задачу, принимая во внимание то, что нули и полюса передаточной функции  $W_1(\lambda)$  — правые. Поэтому уравнения (6) примут вид

$$W_3(\lambda) = \frac{(\lambda - 4)M(\lambda)}{G(\lambda)}, \quad 1 - W_3(\lambda) = \frac{(\lambda^2 - \lambda + 1)N(\lambda)}{G(\lambda)}.$$

Зададимся характеристическим многочленом  $G(\lambda) = \lambda^3 + 2,5\lambda^2 + 3\lambda + 1$ . Тогда, если выбрать полиномы, коэффициенты которых необходимо оп-

ределить, в виде  $M(\lambda) = m_3\lambda + m_4$ ,  $N(\lambda) = n_3\lambda + n_4$ , то условия реализуемости  $n_R + n_M \leq n_G$ ,  $n_Q + n_N = n_G$  будут выполнены. Запишем уравнение (7) для определения искоемых коэффициентов:

$$(\lambda^2 - \lambda + 1)(n_3\lambda + n_4) + (\lambda - 4)(m_3\lambda + m_4) = \lambda^3 + 2,5\lambda^2 + 3\lambda + 1.$$

Приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях, получим систему уравнений:

$$n_3 = 1, \quad n_4 - n_3 + m_3 = 2,5,$$

$$n_3 - n_4 + m_4 - 4m_3 = 3, \quad n_4 - 4m_4 = 1.$$

Решая эту систему уравнений, получим следующие значения искоемых коэффициентов:

$$n_3 = 1, \quad n_4 = 5, \quad m_3 = -1,5, \quad m_4 = 1.$$

Выберем передаточную функцию  $\beta(\lambda) = -\frac{0,25}{\lambda + 5}$  и многочлен  $Q_m(\lambda) = \lambda + 10$ . Тогда алгоритм управления (12) примет вид

$$u(t) = -\alpha \frac{P + 10}{\mu P} (y_2(t) - y_2^*(t)),$$

$$y_2^*(t) = -\frac{1,5P - 1}{P + 5} y_1(P) - \frac{0,25}{P + 5} r. \quad (14)$$

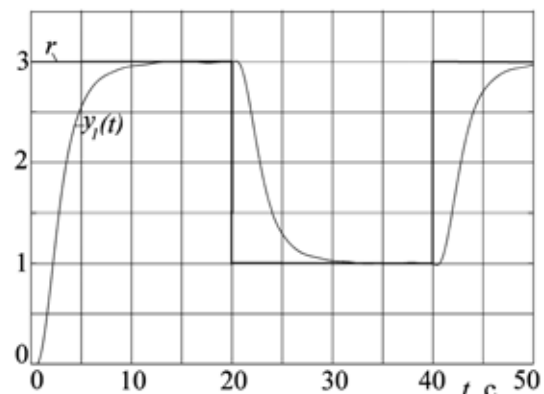


Рис. 1

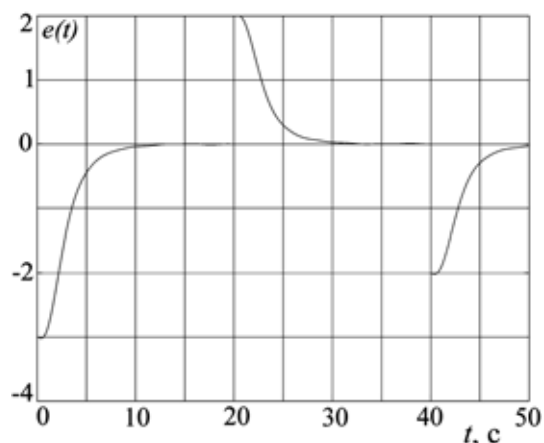


Рис. 2

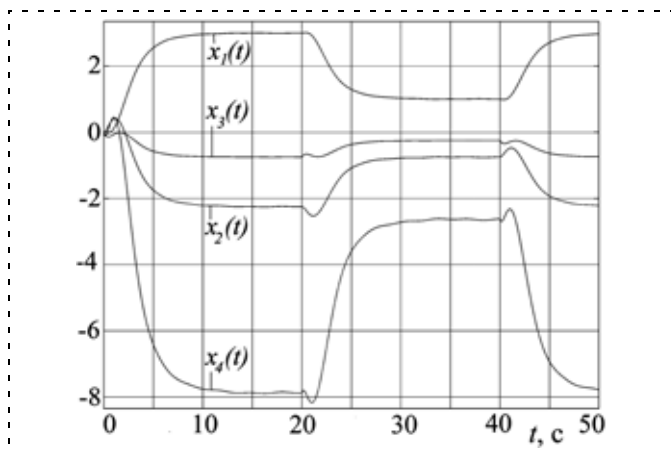


Рис. 3

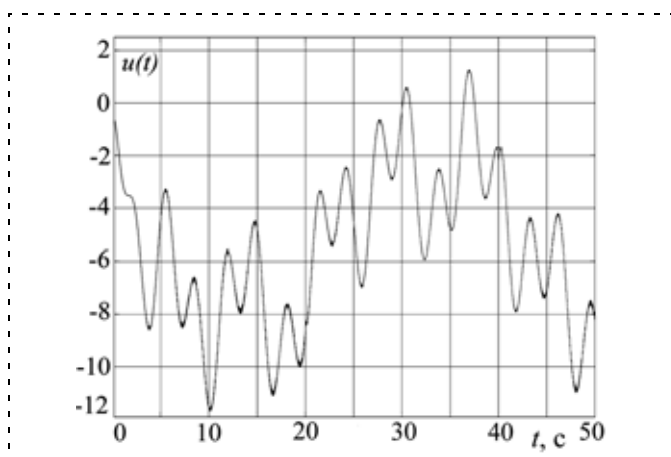


Рис. 4

На рис. 1–4 представлены результаты моделирования системы (13), (14) при следующих исходных данных: начальные условия нулевые,  $a_{31} = a_{41} = a_{33} = a_{43} = 5$ ,  $a_{32} = a_{42} = 2$ ,  $b_1 = d_1 = 1$ ,  $b_2 = d_2 = 2$ ,  $f(t) = 2\sin 0,8t + 2\sin 2t$ ,  $\mu = 0,01$ ,  $\alpha = 3$ .

В данном случае передаточная функция  $W(\lambda)$  имеет вид

$$W(\lambda) = \frac{\lambda^2 - 2\lambda - 8}{\lambda^4 - 6\lambda^3 - 12\lambda^2 + 13\lambda + 21}.$$

На рис. 1 и 2 приведены графики изменения задающего воздействия  $r$ , регулируемой переменной  $y_1(t)$  и ошибки регулирования  $e(t) = y_1(t) - r$ . На рис. 3 и 4 представлены переходные процессы компонент вектора состояния  $x(t)$  и управляющего воздействия  $u(t)$ . Величины  $\delta$  и  $T$  в целевом условии (2) равны 0,05 с и 12 с соответственно для любых параметров из заданного класса неопределенности. Изменение параметров приводит к изменению вида переходного процесса компоненты вектора состояния  $x_4(t)$ . Он будет колебательным, если  $b_1 \neq d_1$  или  $b_2 \neq d_2$ . Графики изменения  $e(t)$  и  $y_1(t)$  при этом остаются без изменения.

**Заключение.** Решена задача проектирования алгоритмического обеспечения робастного управляющего устройства для линейного неминимально-фазового объекта. Полученный алгоритм управления позволяет компенсировать параметрические и внешние ограниченные возмущения с требуемой точностью, если имеется возможность измерять две компоненты вектора состояния объекта управления, математическую модель которого после декомпозиции относительно измеряемых переменных можно представить в виде двух подсистем. При этом одна подсистема должна быть минимально-фазовой, а другая — произвольная.

#### Список литературы

1. Шипанов Г. В. Теория и методы проектирования автоматических регуляторов // А и Т. 1939. № 1. С. 49–66.
2. Петров Б. Н. О реализации условий инвариантности // Тр. 1-го Всесоюз. совещания по теории инвариантности. Киев: Известия отделения технических наук. АН УССР, 1959. С. 59–80.
3. Буков В. Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. Калуга: Изд-во научной лит-ры. Н. Ф. Бочкаревой, 2006.
4. Поляк Б. Т., Щербаков П. С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002.
5. Никифоров В. О. Наблюдатели внешних возмущений. 1. Объекты с известными параметрами // А и Т. 2004. № 10. С. 13–24.
6. Никифоров В. О. Наблюдатели внешних возмущений. 2. Объекты с неизвестными параметрами // А и Т. 2004. № 11. С. 40–48.
7. Никифоров В. О. Нелинейная система управления с компенсацией внешних детерминированных возмущений // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1997. № 4. С. 69–73.
8. Бойцов А. А. Алгоритм робастного управления линейным объектом по выходу с компенсацией неизвестного детерминированного возмущения // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2003. № 2. С. 93–97.
9. Бобцов А. А., Быстров С. В., Григорьев В. В. Компенсация неизвестного синусоидального возмущения для неминимально фазового объекта // Тр. 5-й науч. техн. конф. Мехатроника, автоматизация, управление. СПб.: 2008. С. 37–40.
10. Бобцов А. А. Алгоритмы управления по выходу с компенсацией гармонического возмущения со смещением // А и Т. 2008. № 9.
11. Цыкунов А. М. Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // А и Т. 2007. № 7. С. 103–115.
12. Цыкунов А. М. Алгоритм робастного управления нестационарным объектом с компенсацией возмущения // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2008. № 4. С. 33–40.
13. Цыкунов А. М. Алгоритм робастного управления линейным динамическим объектом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 8. С. 7–12.
14. Цыкунов А. М. Адаптивное и робастное управление динамическими объектами по выходу. М.: Физматлит, 2009.
15. Поляк Б. Т., Топунов М. В. Подавление ограниченных внешних возмущений: управление по выходу // А и Т. 2008. № 5. С. 72–90.
16. Цыпкин Я. З. Основы теории автоматических систем. М.: Наука, 1977.
17. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.

**И. Ф. Чебурахин**, д-р техн. наук, проф.,  
МАТИ-РГТУ им. К. Э. Циолковского,  
**В. И. Цурков**, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
зав. отделом, ВЦ РАН,  
cybernetics@mati.ru

## Специальная реляционная база данных для оптимизации и автоматизации синтеза комбинационных автоматов\*

*Для оптимизации и автоматизации синтеза комбинационных автоматов предлагаются методы на основе структурно-функциональной последовательной (параллельной) декомпозиции булевых функций, а также на основе функциональных уравнений. Получены оценки для показателей качества синтеза в разных базисах: число символов переменных в задающей функцию формуле; число подформул и глубина формулы; число функциональных элементов и глубина схемы, составляющие реляционную базу данных. Некоторые полученные оценки показателей качества — сложности синтеза, представляющие практический интерес, минимальные.*

**Ключевые слова:** булевы функции, синтез формул и схем, декомпозиция, сплошность, показатели качества, минимизация, функциональные и разностные уравнения, многокритериальная оптимизация, реляционная база данных

**Введение. Проблема оптимального синтеза комбинационных автоматов.** Рассматривается проблема представления булевых функций в классе формул и схем из функциональных элементов (комбинационных автоматов) в разных базисах. Проблема, в общем случае, имеет много решений, сложность (качество) получаемых при этом формул и схем оценивается с помощью дискретных функционалов и может сильно различаться. Начальным показателем сложности является размерность булевой функции — число переменных. Некоторым ее обобщением будем считать число символов переменных в задающей функцию формуле. Остальные рассматриваемые показатели качества (число подформул и глубина формулы; число функциональных элементов (ФЭ) и глубина схемы) являются производными этого показателя в большей или меньшей степени. По практическим соображениям показатели качества (функционалы) минимизируем. Большая трудоемкость получения оптимального по какому-либо показателю решения, неизбежно использующего алгоритмы переборного характера, привела к поиску новых подходов постановки задачи и ее решения. В их числе асимптотический подход, основывающийся на функции Шеннона. Используя его, О. Б. Лупанов первым разработал метод и получил асимптоти-

ческую оценку числа элементов схемы, реализующей булеву функцию. В работах Ю. И. Журавлева, С. В. Яблонского и Д. А. Поспелова предложено ограничить трудоемкость синтеза и в ограниченном классе искать алгоритмы, приводящие к схемам наилучшего качества. Также показано, что в классе алгоритмов, заметно отличающихся по трудоемкости от переборных, далеко не всегда удается получить решение, сколько-нибудь близкое к оптимальному [1–4].

Несмотря на имеющиеся успехи в области синтеза схем, в теории булевых функций нет полных ответов на следующие вопросы. Как использование скобочных формул или операции ветвления выходов ФЭ позволяет минимизировать их число в схеме? Во сколько раз или как может измениться сложность функции при переходе из одного базиса в другой?

В связи со всем сказанным в статье предпринята попытка ответить на возникшие и другие вопросы. Многие результаты, опубликованные в разных работах, собраны в данной, причем предложены методы синтеза формул и схем и получены оценки соответствующих показателей качества—сложности, ниже перечисляемых. На основе оценок предлагается специализированная реляционная база данных (БД), применяемая для оптимизации и автоматизации синтеза комбинационных автоматов на основе классификации множества булевых функций и совершенствования методов декомпозиции. Известно, что реляционные базы данных эффективно используются для автоматизации процесса указанного синтеза, который может выполняться аппаратными или программными средствами.

Несмотря на то, что задачи структурного синтеза трудно формализуемы, имеются определенные успехи в области конструкторского проектирования печатных плат и кристаллов БИС, логического синтеза комбинационных схем цифровой автоматики вычислительной техники. При этом качество схемы часто характеризуется многими показателями, которые требуется оптимизировать. Таким образом, возникает многокритериальная задача, для которой становятся востребованными методы вычислительной математики [5–9].

В работе [10] предлагается технология алгоритмизации и программирования задач логического управления. В рамках созданной технологии предлагается использовать два уровня языков: языки алгоритмизации (языки общения) и языки программирования (языки реализации), которые могут совпадать или различаться между собой. Для обоснования рекомендации сравнивается аппаратная реализация систем логического управления в базисе релейно-контактных схем, причем для языка алгоритмизации применяются функциональные схемы, а для языка реализации — собственно релейно-контактные схемы. Плохая "читаемость" одних и других схем потребовала определенной разъясняющей доработки, корректировки технологии.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 09-01-90441 Укр Ф.

Отметим также, что язык алгоритмизации не всегда может быть определен. На наш взгляд, в таких случаях надо развивать, расширять функциональные возможности языка алгоритмизации в направлении получения показателей сложности синтеза.

В статье используются следующие обозначения:  $\lceil x \rceil$  — наименьшее целое, не меньшее числа  $x$ ;  $\&$  — логическое умножение; знак точка ( $\cdot$ ) в зависимости от смысла понимается или как логическое, или арифметическое умножение;  $\neg$  (или надчеркивание над переменной, например  $\bar{x}$ ) — отрицание;  $A \times B$  — декартово произведение множеств  $A$  и  $B$ . В записи формул для простоты иногда внешние скобки опускаем.

**Основополагающие понятия теории комбинационных автоматов: булевы функции, базисы, формулы и схемы, показатели сложности, методы синтеза формул и схем. Уточнение постановки задачи.** Пусть  $f^{(n)}$  — булева функция, зависящая от  $n$  существенных переменных из множества  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ . Считаем, что вначале фиктивные переменные автоматизированно определяются и исключаются, используя для этой цели различные методы и средства, например эквивалентность:

$$K_1 \cdot K_2 \vee \bar{K}_1 \cdot K_3 \vee K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 = K_1 \cdot K_2 \vee \bar{K}_1 \cdot K_3.$$

При этом  $K_i, i = 1, 2, 3, 4$ , — элементарная конъюнкция над множеством переменных  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ ;  $K'_i$  — множество переменных, входящих в элементарную

конъюнкцию  $K_i$ ;  $\bigcup_{i=1}^4 K'_i \subseteq X$  и  $K'_4 \cap \left( \bigcup_{i=1}^3 K'_i \right) = \emptyset$ .

Тогда  $K'_4$  — множество удаляемых фиктивных переменных. Заметим, что для некоторых функций фиктивные переменные могут вводиться.

Под базисом понимаем произвольную конечную функционально полную систему булевых функций. В статье рассматриваем в основном следующие базисы:  $G_1 = \{\&, \vee, \neg\}$  и  $G_3 = \{\&, \oplus, 1\}$  для всех булевых функций;  $G_2 = \{\&, \vee\}$  для монотонных функций.

Считаем, что в рассматриваемых ниже полиномах Жегалкина константа 1 (элементарная конъюнкция нулевого ранга) отсутствует. При реализации их формулами и схемами получаемые оценки показателей сложности переносятся на полиномы Жегалкина, содержащие соответственно константы 1, с учетом увеличения размерности функции не более, чем на единицу.

При представлении булевой функции  $f^{(n)}$  суперпозиционной формулой  $F$  над множеством функциональных символов применяются конструктивные операции из некоторого их множества  $W$  (перестановка элементарных конъюнкций-дизъюнкций в формуле, а в ней — переменных; замена подформулы новой переменной; вынесение общих множителей за скобки, обратные им операции и другие, а также эквивалентности). Ниже они поясняются, поэтому обозначения последовательности

из  $W$  проводимых операций опускаем. В качестве меры сложности—качества представления функции  $f$  формулой  $F$  или схемой  $S$  из ФЭ определяем соответствующие показатели (дискретные функционалы):

$L_G(f, G)$  — число букв в формуле  $F$ , реализующей (задающей) функцию  $f$ , в классе формул в заданном базисе  $G$ ;

$L_F(f, G)$  — число подформул в  $F$ ;

$\text{Dep}_F(f, G)$  — глубина  $F$ ;

$L_S(f, G)$  — число ФЭ в схеме  $S$ ;

$\text{Dep}_S(f, G)$  — глубина  $S$ , определяемая как наибольшее число ФЭ в цепочке среди всех цепочек, соединяющих вход с выходом.

В работах [11—13] предлагаются методы синтеза схем из ФЭ на основе структурно-функциональной последовательной декомпозиции (СФПоД) и структурно-функциональной параллельной декомпозиции (СФПаД) булевых функций. СФПаД имеет предпочтение перед СФПоД в отношении минимизации глубины. При этом  $\text{Dep}_S = \text{Dep}_F$ .

Рассмотрим несколько определений разных типов функциональных уравнений (ФУ), относящихся к новым методам [14—25].

Пусть  $X$  — множество булевых переменных,  $g^{(2)}$  — двухместная булева функция, задающая начальный член  $f^{(2)}$  последовательности изучаемого класса функций  $f^{(n)}(X), n \geq 2$ , и  $h^{(2)}$  — функция рекурсии, входящая в базис  $G$  или представляемая через базисные функции. Тогда рекуррентное соотношение, получаемое на основе операции суперпозиции,

$$f^{(n_1 + n_2)}(X) = h(f^{(n_1)}(X_1), f^{(n_2)}(X_2)), \quad (1)$$

где  $X_1 \cup X_2 = X, X_1 \cap X_2 = \emptyset, n_1, n_2 \in N, n = n_1 + n_2$ , назовем основным функциональным уравнением, несмотря на частный характер местности функций  $g^{(2)}$  и  $h^{(2)}$ . Данное определение ФУ отлично от [26—27].

Соотношение (1) применяется к аргументам функции  $h$  и так далее, позволяя получить суперпозиционную формулу  $F$ , реализующую функцию  $f^{(n)}$ . Таким образом, ФУ представляет собой конструктивный метод построения булевых функций определенного класса на основе заданных.

- При  $n_1 = n - 1, n_2 = 1$  получаем ФУ типа 1 (сокращенно ФУ 1)

$$f^{(n)} = h(f^{(n-1)}, x_n);$$

- для симметрических функций при  $n = 2^s, s = 1, 2, \dots, n_1 = n_2 = n/2$  получаем ФУ типа 2 (ФУ 2)

$$f^{(n)}(X) = h(f^{(n/2)}(X_1), f^{(n/2)}(X_2));$$

- при  $n_1 = n - 2, n_2 = 2$  это будет ФУ типа 3 (ФУ 3)

$$f^{(n)} = h^{(3)}(f^{(n-2)}, x_{n-1}, x_n),$$

где  $h^{(3)}$  — трехместная булева функция.

*Уточнение задачи* [14—25]. Как отмечалось выше, целью данной работы является подведение определенных итогов в решении задачи реализации заданной булевой функции  $f^{(n)} \in D \subset P_2$  суперпо-



зиционной формулой  $F$  и схемой  $S$  из ФЭ в разных базисах  $G$ , где  $D$  — некоторый класс булевых функций. При этом важно не только аналитически получить оценки  $L_6(f^{(n)}, G, w)$ ,  $L_F(f^{(n)}, G, w)$ ,  $\text{Der}_F(f, G, w)$ ,  $L_S(f^{(n)}, G, w)$  и  $\text{Der}_S(f, G, w)$  выше перечисленных показателей сложности, но и минимизировать их. Сложным здесь является вопрос выделения классов  $D_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ , булевых функций из  $P_2$ , т. е.

$\bigcup_{i=1}^k D_i = P_2$ . Для каждой функции  $f^{(n)}$  из выбранного класса  $D = D_i$ , базиса  $G$  и метода  $w$  нужно "связать" все ее показатели качества с помощью специального отношения  $\mathfrak{R}$  (определяемого ниже), т. е. саму функцию  $f^{(n)}$ , базис  $G$ , метод  $w$ , показатели:  $L_6(f^{(n)}, G, w)$ ,  $L_F(f^{(n)}, G, w)$ ,  $\text{Der}_F(f^{(n)}, G, w)$ ,  $L_S(f^{(n)}, G, w)$ ,  $\text{Der}_S(f^{(n)}, G, w)$ , получая специальную импликацию. При этом  $f^{(n)} \in D \subset P_2$ ,  $g^{(2)} \in G \subset P_2$  и  $w \in W$  образуют условие (антецедент) — запрос, а область значений показателей (сохраняется обозначение)  $L_6, L_F, \text{Der}_F, L_S, \text{Der}_S \subseteq N$  и вместе с формулой  $F$  и схемой  $S$  и последними показателями сложности образуют соответствующее заключение (консеквент). Условие и заключение рассматривается на декартовом произведении  $D \times G \times W \times L_6 \times L_F \times \text{Der}_F \times L_S \times \text{Der}_S$  множеств  $D, G, W, L_6, L_F, \text{Der}_F, L_S$  и  $\text{Der}_S$ , из которых пять последних показателей интерпретируются или как некоторое значение оценки, или как множество таких значений, входящих в  $N$ .

Между собой показатели качества имеют сложные связи. Один из главных показателей —  $L_6$ , он минимизируется за счет привлечения аппарата булевой алгебры и расширения класса моделей (включаются скобочные формулы) при реализации булевых функций. Уменьшение показателя  $L_6$  влечет уменьшение  $L_S$ . Это приводит к увеличению надежности схемы (специальные методы повышения надежности здесь не рассматриваются). Заметим, что от показателя  $L_6$  разным образом зависят остальные из перечисленных выше показателей. При многокритериальной минимизации показателей качества синтеза минимизация одного показателя качества может непредсказуемо изменять другие показатели. Например, минимизация  $L_6$  в классе скобочных формул приводит к минимизации  $L_F$ , но глубина суперпозиционной формулы  $F$  (схемы  $S$ ) может изменяться любым образом, и это — предмет изучения. То же самое относится к методу синтеза схем посредством использования операции ветвления выходов ФЭ, входящих в схему, что также требует изучения. Уменьшение показателя  $L_S$  таким способом (за счет ветвления) может привести к увеличению глубины  $\text{Der}_S$  схемы  $S$ .

Поясняем ситуацию, которая может быть. При формализации задачи, исследуя условие импликации, получаем разбиение части (на которой выполняется отношение  $\mathfrak{R}$ ) множества  $D \times G \times W$  на три подмножества. Пусть для первого подмноже-

ства (случая) достигается минимум для показателя  $L_S$  (для показателя  $\text{Der}_S$  получается некоторая верхняя оценка), для второго подмножества (случая) все наоборот, для третьего подмножества (случая) минимум достигается для каждого из обоих показателей. Принятие решения о выборе случая зависит от установки предпочтений.

**Реляционная база данных и случаи многокритериальной оптимизации синтеза формул и схем.** Итак, на основе декомпозиции булевой функции  $f^{(n)}$  из определенных классов предложены соответствующие методы синтеза формул  $F$  и схем  $S$  из ФЭ в базисе  $G$ . Отметим, что некоторые средства многокритериальной оптимизации синтеза изложены в [12—15, 19].

Полученные результаты исследования заносятся в две специализированные таблицы [11—14, 21—24]. Специальная (С-таблица) (табл. 1) представляет собой описание полученной формулы  $F$  и/или схемы  $S$ . С-таблица заполняется, когда для выбранного показателя сложности требуется определенным методом получить формулу  $F$  или схему  $S$ . В качестве примера для базиса  $G_1 = \{\&, \vee, \neg\}$  в табл. 1 занесены данные о функциональных элементах, соответствующих базису  $G_1$ . В С-таблице ФЭ записывается прямым шрифтом, а реализуемая им функция — курсивом.

Вторая таблица построчно содержит функцию  $f^{(n)}$ , базис  $G$  и метод  $w$ , а также оценки показателей сложности полученной формулы  $F$  и/или схемы  $S$ :  $L_6(f^{(n)}, G, w)$ ,  $L_F(f^{(n)}, G, w)$ ,  $\text{Der}_F(f^{(n)}, G, w)$ ,  $L_S(f^{(n)}, G, w)$ ,  $\text{Der}_S(f^{(n)}, G, w)$ . Некоторые из них и их уточнения собраны в табл. 2—5 (таблица содержит функции одного класса). Для базы знаний они объединяются в одну таблицу (О-таблицу), в которую вносятся новые знания и корректируются имеющиеся. В заголовке О-таблицы (реляционной базы данных) столбцам упорядоченно соответствуют определенные имена: класс функций, базис, метод синтеза, оценки сложности по числу букв, числу подформул, глубине формулы  $F$ , числу ФЭ и глубине схемы  $S$ .

Формула-оценка в столбцах 5—8 табл. 2—5 имеет статус или "минимальная" или "верхняя". Исследовательская работа продолжается в направлении получения классов рассматриваемых функций, покрывающих множество  $P_2$ , а также минимизации верхних оценок показателей сложности.

В табл. 2 приводятся оценки сложности функции  $f_{\vee}^{(n)}$  —  $n$ -местной дизъюнкции (звездочкой \* отмечается минимальная оценка в этой и других таблицах).

Таблица 1

$N$ — номер ФЭ	$p$ — номер секции-итерации	ФЭ	Входы		Выход — реализуемая функция
			1	2	
$N = 1$	$p = 1$	$g_{-1}$	$x_1$	—	$y_1 = g_{-1}$
2		$g_{\&2}$	$x_1$	$x_2$	$y_2 = g_{\&2}$
3		$g_{\vee3}$	$x_1$	$x_2$	$y_3 = g_{\vee3}$

В табл. 3 приводятся оценки сложности функции  $f_{\oplus}^{(n)}$  —  $n$ -местной линейной функции.

В табл. 4 приводятся оценки сложности элементарных симметрических полиномов Жегалкина  $F_i^{(n)}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

В табл. 5 приводятся оценки сложности функции  $f_{\rightarrow}^{(n)}$  (на основе функции импликации).

Таким образом, каждой строке О-таблицы соответствует отношение  $\mathfrak{R}(f^{(n)}, G, \mathfrak{w}, L_{\mathcal{G}}(f^{(n)}, G, \mathfrak{w}), L_F(f^{(n)}, G, \mathfrak{w}), \text{Der}_F(f^{(n)}, G, \mathfrak{w}), L_S(f^{(n)}, G, \mathfrak{w}), \text{Der}_S(f^{(n)}, G, \mathfrak{w}))$ : "Функция  $f^{(n)}$  в базисе  $G$  методом

$\mathfrak{w}$  реализуется формулой  $F^{(n)}$  и схемой  $S$  с оценками показателей качества  $L_{\mathcal{G}}(f^{(n)}, G, \mathfrak{w}), L_F(f^{(n)}, G, \mathfrak{w}), \text{Der}_F(f^{(n)}, G, \mathfrak{w}), L_S(f^{(n)}, G, \mathfrak{w}), \text{Der}_S(f^{(n)}, G, \mathfrak{w})$ . Отметим, что в О-таблицу заносятся только такие данные, которые удовлетворяют отношению  $\mathfrak{R}$  (отношение истинно, имеет место).

Для логической модели представления знаний основными фактами являются формула  $F^{(k)}$ ,  $2 \leq k \leq n$ , и схема  $S$ , а также оценки  $L_{\mathcal{G}}, L_F, \text{Der}_F, L_S$  и  $\text{Der}_S$  показателей качества, являющиеся выводимыми производными от конкретных данных

Таблица 2

Функция $f_{\vee}^{(n)}$						
Базис $G$	Метод $\mathfrak{w}$	Показатели сложности (сокращенно)				
		$L_{\mathcal{G}}$	$L_F$	$\text{Der}_F$	$L_S$	$\text{Der}_S$
2	3	4	5	6	7	8
$g_{\vee}^{(2)}$	СФПоД СФПад	$n$ $n$	$n-1$ $n-1$	$n-1$ $\lceil \log_2 n \rceil^*$	$n-1$ $n-1$	$n-1$ $\lceil \log_2 n \rceil$
$g_{\vee}^{(m)}, m > 2$	СФПоД СФПад	$n$ $n$	$\lceil (n-1)/(m-1) \rceil^*$ $\lceil (n-1)/(m-1) \rceil^*$	$\lceil (n-1)/(m-1) \rceil$ $\lceil \log_m n \rceil^*$	$\lceil (n-1)/(m-1) \rceil^*$ $\lceil (n-1)/(m-1) \rceil^*$	$\lceil (n-1)/(m-1) \rceil$ $\lceil \log_m n \rceil^*$
$G_3$	СФПад	$n \cdot 2^{n-1}$	$n \cdot 2^{n-1} - 1$	$n + \lceil \log_2 n \rceil$	$n \cdot 2^{n-1} - 1$	$n + \lceil \log_2 n \rceil$
	ФУ1-1	$3 \cdot 2^{n-1} - 2$	$3(2^{n-1} - 1)$	$2(n-1)$	$3(n-1)$	$2(n-1)$
	ФУ1-2	$3n - 2$	$3(n-1)$	$3(n-1)$	$3(n-1)$	$3(n-1)$
	СФПад	$2n + 1$	$2n$	$\lceil \log_2 n \rceil + 2$	$2n$	$\lceil \log_2 n \rceil + 2$
	ФУ1	$4n - 3$	$4(n-1)$	$3(n-1)$	$4(n-1)$	$3(n-1)$
	ФУ2	$4n - 3$	$4(n-1)$	$3(n-1)$	$4(n-1)$	$3(n-1)$
	ФУ1-3	$3 \cdot 2^{n-1} - 2$	$3(2^{n-1} - 1)$	$3(n-1)$	$3(n-1)$	$3(n-1)$
	ФУ2-1 ФУ2-2	$n^2$ $(3^{\log_2 n + 1} - 1)/2$	$n^2 - 1$ $3(3^{\log_2 n} - 1)/2$	$2\lceil \log_2 n \rceil$ $3\lceil \log_2 n \rceil$	$3(n-1)$ $3(n-1)$	$2\lceil \log_2 n \rceil$ $3\lceil \log_2 n \rceil$

Таблица 3

Функция $f_{\oplus}^{(n)}$						
Базис $G$	Метод $\mathfrak{w}$	Показатели сложности (сокращенно)				
		$L_{\mathcal{G}}$	$L_F$	$\text{Der}_F$	$L_S$	$\text{Der}_S$
2	3	4	5	6	7	8
$g_{\oplus}^{(2)}$	СФПоД СФПад	$n$ $n$	$n-1$ $n-1$	$n-1$ $\lceil \log_2 n \rceil^*$	$n-1$ $n-1$	$n-1$ $\lceil \log_2 n \rceil$
$g_{\oplus}^{(m)}, m > 2$	СФПоД СФПад	$n$ $n$	$\lceil (n-1)/(m-1) \rceil^*$ $\lceil (n-1)/(m-1) \rceil^*$	$\lceil (n-1)/(m-1) \rceil$ $\lceil \log_m n \rceil^*$	$\lceil (n-1)/(m-1) \rceil^*$ $\lceil (n-1)/(m-1) \rceil^*$	$\lceil (n-1)/(m-1) \rceil$ $\lceil \log_m n \rceil^*$
$G_1$	СФПад	$n2^{n-1}$	$n2^{n-1} - 1$	$\lceil n + \log_2 n \rceil$	$n \cdot 2^{n-1} - 1$	$n + \lceil \log_2 n \rceil$
	ФУ1-1	$3 \cdot 2^{n-1} - 2$	$5(2^{n-1} - 1)$	$3(n-1)$	$5(2^{n-1} - 1)$	$3(n-1)$
	Ветвление ФУ1-2	$3 \cdot 2^{n-1} - 2$	$4(2^{n-1} - 1)$	$3(n-1)$	$5(n-1)$	$3(n-1)$
	Ветвление ФУ2-1	$n^2$	$5(n^2 - 1)/3$	$3\lceil \log_2 n \rceil$	$4(2^{n-1} - 1)$	$4(n-1)$
	Ветвление ФУ2-2	$n^2$	$5(n^2 - 1)/3$	$3\lceil \log_2 n \rceil$	$5(n^2 - 1)/3$	$5(n-1)$
	Ветвление	$n^2$	$4(n^2 - 1)/3$	$3\lceil \log_2 n \rceil$	$4(n^2 - 1)/3$	$4(n-1)$

(класса  $D$  функций  $f^{(k)}$ , базиса  $G$  и метода синтеза  $w$ ). Описание формулы  $F^{(k)}$  и схемы  $S$  хранится в С-таблице, а исходных данных и результатов вывода — в О-таблице (реляционной базе данных), дополняемой специальными программами для вычислений.

Таким образом, получение новых и интересующих нас знаний выполняется на основе специальной импликации (правила вывода), которую здесь запишем в объединенном виде для всех показателей:

**Если**  $(f^{(k)}, G, w)$ , **то**  $(F^{(k)}, S, L_6, L_F, \text{Dep}_F, L_S, \text{Dep}_S)$ , где  $w$  — конструктивный способ представления функции  $f^{(k)}$  в базисе  $G$  формулой  $F$  (затем схемой  $S$ ). **Импликация истинна** (вывод правильный) тогда и только тогда, когда для **правильного условия** определяется **правильное заключение** (из соответствующего отношения  $\mathfrak{R}$ ).

Кратко опишем функционирование базы данных для основной задачи. *Требуется* реализовать функцию  $f^{(k)} \in D \subset P_2$ ,  $2 \leq k \leq n$  (достаточно, чтобы число  $k$  было натуральное и конечное) в классе

схем  $S$  из  $\Phi\mathfrak{E}$  в базисе  $G$ , удовлетворяя требованию минимизации по показателю  $L_S$  (и/или  $\text{Dep}_S$ ).

*Решение.* В О-таблице для столбца с именем  $L_S$  (или  $\text{Dep}_S$ ) выводится "минимальный" элемент, которому соответствует имя программы с параметром  $k$ , вычисляющей требуемую оценку, а также определяется метод  $w$  синтеза формулы  $F$  и схемы  $S$ . Выполняется синтез формулы  $F^{(k)}$  с использованием С-таблицы. На основе формулы  $F^{(k)}$  строится схема  $S$ , и для параметра  $k$  по аналогичным программам вычисляются остальные соответствующие оценки показателей качества. Итак, для данной О-таблицы получена схема  $S$  с почти минимальными или рационально полученными значениями показателей качества и такой же вычислительной сложностью. Последнее объясняется тем, что алгоритм решения задачи почти "линейный", состоит из небольшого числа теоретически полученных и обоснованных вариантов состояния базы данных. Это также обеспечивает повышение качества синтеза.

Таблица 4

Функция $F_1^{(n)} = f_{\oplus}^{(n)}$						
Базис $G$	Метод $w$	Показатели сложности (сокращенно)				
		$L_6$	$L_F$	$\text{Dep}_F$	$L_S$	$\text{Dep}_S$
2	3	4	5	6	7	8
$g_{\oplus}^{(2)}$	СФПад	$n$	$n - 1$	$\lceil \log_2 n \rceil^*$	$n - 1^*$	$\lceil \log_2 n \rceil$
	ФУ1	$n$	$n - 1$	$n - 1$	$n - 1^*$	$n - 1$
	ФУ2	$n$	$n - 1$	$\lceil \log_2 n \rceil$	$n - 1^*$	$\lceil \log_2 n \rceil$
Функция $F_2^{(n)}$						
$G_3$	СФПад ФУ1 Ветвление	$n$ $(n^2 + n - 2)/2$	$n - 1$ $(n^2 + n - 4)/2$	$\lceil \log_2 n \rceil$ $n$	$n - 1$ $(n^2 + n - 4)/2$ $3n - 5^*$	$\lceil \log_2 n \rceil$ $n$
Функция $F_3^{(n)}$						
$G_3$	ФУ1 Ветвление	$(n^3 - n - 6)/6$	$(n^3 - n - 12)/6$	$n + 1$	$2n^2 - 10n + 15$ $5n - 13^*$	$n + 1$
Функция $F_{n-2}^{(n)}$						
$G_3$	ФУ1 Ветвление	$(n^4 - 6n^3 + 11n^2 + 2n + 16)/8$	$(n^4 - 6n^3 + 11n^2 + 2n + 8)/8$	$n + 1$	$(n^4 - 6n^3 + 11n^2 + 2n + 8)/8$ $5n - 13^*$	$n + 1$
Функция $F_{n-1}^{(n)}$						
$G_3$	ФУ1 Ветвление	$(n^2 + n - 2)/2$	$(n^2 + n - 4)/8$	$2n - 3$	$(n^2 + n - 4)/2$ $3n - 5^*$	$2n - 3$
Функция $F_n^{(n)} = g_{\&}^{(2)}$						
$f_{\&}^{(2)}$	СФПад	$n$	$n - 1$	$\lceil \log_2 n \rceil^*$	$n - 1$	$\lceil \log_2 n \rceil$
	ФУ1	$n$	$n - 1$	$n - 1$	$n - 1$	$n - 1$
	ФУ2	$n$	$n - 1$	$\lceil \log_2 n \rceil^*$	$n - 1$	$\lceil \log_2 n \rceil$

Функция $f_{\rightarrow}^{(n)}$						
Базис $G$	Метод $w$	Показатели сложности (сокращенно)				
		$L_G$	$L_F$	$Dep_F$	$L_S$	$Dep_S$
2	3	4	5	6	7	8
$g_{\rightarrow}^{(2)}$	ФУ1	$n$	$n - 1$	$n - 1$	$n - 1$	$n - 1$
$G_1$	ФУ1	$n$	$2(n - 1)$	$2(n - 1)$	$2(n - 1)$	$2(n - 1)$
	ФУ3	$n$ $n$	$3n/2 - 1$ $3(n - 1)/2 - 1$	$3n/2 - 1$ $3(n - 1)/2 - 1$	$3n/2 - 1$ $3(n - 1)/2 - 1$	$3n/2 - 1, n = 2k, k \in N$ $3(n - 1)/2 - 1, n = 2k - 1, k \in N$
Функция $f_{\leftarrow}^{(n)} = f_{\text{ПЛ}}$						
$G_1$	СФПад	$n$	$n$	$\lceil \log_2(n - 1) \rceil + 2$	$n$	$\lceil \log_2(n - 1) \rceil + 2$

С помощью О-таблицы решаются также следующие задачи:

- реализовать функцию  $f^{(k)} \in D$  в базисе  $G$  методом  $w$  в классе формул (схем из ФЭ) и получить соответствующие значения показателей качества;
- рационально реализовать функцию  $f^{(k)} \in D$  в базисе  $G$  в классе формул (схем из ФЭ) и получить соответствующие значения показателей качества;
- для функции  $f^{(k)}$  определить базис  $G$ , для которого достигается минимум показателя  $L_G$  исходной функции;
- для функции  $f^{(k)}$  и базиса  $G$  определить метод  $w$  преобразования (декомпозиции), с помощью которого достигается минимум  $L_G(f^{(k)}, G, w)$  для исходной формулы.

Запросы к базе данных (О-таблице) имеют вид:

- $\langle f^{(k)}, G, w \rangle_S, \langle f^{(k)}, G \rangle_S$  — для класса схем;
- $\langle f^{(k)}, G, w \rangle_F, \langle f^{(k)}, G \rangle_F$  — для класса формул;
- $\langle f^{(k)}, G \rangle_{\min}$  — для получения множества преобразований формулы в базисе  $G$  и получения минимума показателя  $L_G$ .

Из О-таблицы, в частности, следуют ответы на вопросы о том, например, как меняется сложность функции  $f_{\sqrt{}}^{(n)}$  при переходе из базиса  $G_1$  в  $G_3$

$$L_G(f_{\sqrt{}}^{(n)}, G_3) / L_G(f_{\sqrt{}}^{(n)}, G_1) = (2n + 1) / n = 2 + 1/n,$$

а также — как можно получить другие сравнения.

О-таблицу можно рассматривать как вариант некоторой упрощенной базы знаний, которая включается в разрабатываемую формальную систему естественного логического вывода (ЕЛВ), спецификой которого является максимальное приближение к содержательному рассуждению [28].

Естественность вывода означает, что в его основе лежат формализованные причинно-следственные связи между параметрами исходных математических моделей и показателями сложности — качества синтезированных логических схем, а также тот факт, что осуществляется он по общеупотребительным правилам логических переходов.

Качество вывода оценивается с позиций отсутствия излишних применений правил вывода и получения минимальных или близких к ним показателей качества синтезированных логических схем. Конструктивный, итерационный характер предлагаемых методов позволяет для отдельных классов булевых функций и соответствующих базисов успешно завершать требуемый вывод (суперпозиционной формулы  $F$  и схемы  $S$ ).

Считаем, что требования, необходимые для создания формальной дедуктивной системы, в основном выполняются [4, 28]. При этом отметим лишь важные отличия и направления развития такой системы: допускается избыточность системы аксиом; разрешается расширение списка правил вывода за счет пополнения знаний о предметной области; описание, хранение и использование информации о предметной области осуществляется благодаря ее нестандартному кодированию [14—21].

### Заключение

Рассмотрены методы представления булевых функций в классах формул и схем из ФЭ. Качество — сложность получаемых схем оценивается с помощью соответствующих функционалов (в классе формул: число букв, подформулы, глубина суперпозиционной формулы; в классе схем: число элементов, глубина), выражаемых через исходные числовые параметры (начальные данные: описания булевых функций). Результаты синтеза оформляются с помощью специальной таблицы — базы знаний.

Оптимизация по перечисленным выше показателям синтеза схем достигается благодаря использованию структурно-функциональной декомпозиции, применению методов функциональных уравнений и специфических дискретных методов.

### Список литературы

1. Лупанов О. Б. Об одном подходе к синтезу управляющих систем — принципе локального кодирования // Проблемы кибернетики. Вып. 14. М.: Наука, 1965. С. 31—110.

2. Журавлев Ю. И. Теоретико-множественные методы в алгебре логики // Проблемы кибернетики. 1962. № 8.
3. Яблонский С. В. Об алгоритмических трудностях синтеза минимальных контактных схем // Проблемы кибернетики. 1959. № 2.
4. Поспелов Д. А. Логические методы анализа и синтеза схем. М.: Энергия, 1974.
5. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования. М.: Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2006. С. 447.
6. Корячко В. П., Курейчик В. М., Норенков И. П. Теоретические основы САПР. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 398.
7. Норенков И. П., Маничев В. Б. Основы теории и проектирования САПР. М.: Высшая школа. С. 334.
8. Капитонова Ю. В., Летичевский А. А. Математическая теория проектирования вычислительных систем. М.: Наука, 1988.
9. Юдин Д. Б., Горяшко А. П., Немировский А. С. Математические методы оптимизации устройств и алгоритмов АСУ / Под ред. Ю. В. Асафьева, В. А. Шабалина. М.: Радио и связь, 1982.
10. Шальто А. А. Автоматное проектирование программ. Алгоритмизация и программирование задач логического управления // Изв. РАН. ТиСУ. № 6. 2000. С. 63—81.
11. Цурков В. И. Декомпозиция в задачах большой размерности. М.: Наука, 1981.
12. Чебурахин И. Ф. Синтез дискретных управляющих систем и математическое моделирование: алгоритмы, программы. М.: Физматлит, 2004.
13. Чебурахин И. Ф. Синтез быстродействующих дискретных логических устройств на основе структурно-функциональной декомпозиции // Изв. РАН. ТиСУ. 2004. № 4.
14. Чебурахин И. Ф. Основные понятия теории конечных автоматов и некоторые ее приложения. Учеб. пособ. М.: Изд. центр МАТИ-РГТУ, 2005.
15. Чебурахин И. Ф. Сложность булевых функций для интеллектуальных систем синтеза цифровых ИС // Изв. РАН. ТиСУ. № 3. 2006. С. 150—165.
16. Чебурахин И. Ф. Функциональные уравнения и сложность булевых функций в разных базисах // Тр. VII Междунар. конф. "Дискретные модели в теории управляющих систем" (Покровское, 4—6 марта 2006г.). М.: МАКС Пресс, 2006. С. 405—411.
17. Чебурахин И. Ф. Математические модели для рационального синтеза алгоритмов логического управления // Мехатроника, управление, автоматизация. № 12. 2006.
18. Чебурахин И. Ф. Преобразования функциональных уравнений и показатели сложности булевых функций // Тр. 9-го Междунар. семина. "Дискретная математика и ее приложения", посвященного 75-летию со дня рождения акад. О. Б. Лупанова. 18—23 июня 2007. М.: Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова. 2007.
19. Чебурахин И. Ф. Показатели сложности симметрических полиномов Жегалкина // Тез. докл. XV Междунар. конф. "Проблемы теоретической кибернетики" (Казань, 2—7 июня 2008 г.). Казань, 2008.
20. Чебурахин И. Ф. Сложность симметрических полиномов Жегалкина // XVII Междунар. школа-семинар "Синтез и сложность управляющих систем" им. акад. О. Б. Лупанова. (27.10—1.11.2008. Новосибирск). 2008. С. 60—63.
21. Чебурахин И. Ф. Математические модели для интеллектуализации синтеза дискретных логических управляющих устройств на основе цифровых интегральных схем // Изв. РАН. ТиСУ. № 1. 2008. С. 68—77.
22. Чебурахин И. Ф., Цурков В. И. Оптимизация и автоматизация синтеза симметрических комбинационных автоматов на основе БМК // Мехатроника, автоматизация, управление. № 7. 2009. С. 19—29.
23. Чебурахин И. Ф., Цурков В. И. Интеллектуализация и миниатюризация устройств обработки информации в мехатронных системах // Матер. Междунар. научно-техн. конф. (28.09—03.10.2009, Геленджик, Россия), "Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники (МАУ-2009)". Таганрог-Москва, 2009. С. 218—220.
24. Чебурахин И. Ф. О сложности булевых функций из разных классов // Тр. VIII Междунар. конф. "Дискретные модели в теории управляющих систем". Москва, 6—9 апреля 2009. М.: Изд-во мех.-матем. ф-та МГУ, 2009. С. 329—334.
25. Чебурахин И. Ф. О сложности реализации симметрических полиномов // 18-я Междунар. школа-семинар "Синтез и сложность управляющих систем" им. акад. О. Б. Лупанова. (27.09—01.10.2009. Пенза). 2009. С. 93—94.
26. Успенский В. А. Лекции о вычислимых функциях. М.: Наука, 1960.
27. Мальцев А. И. Алгоритмы и рекурсивные функции. М.: Наука, 1965.
28. Шанин Н. А. и др. Алгоритм машинного поиска естественного логического вывода в исчислении высказываний. М.—Л.: Наука, 1965.

УДК 519.216

**Т. А. Алиев**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, академик НАН Азербайджана, директор,  
**Н. Ф. Мусаева**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, зав. лаб.,  
**Г. А. Гулуев**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, директор,  
**У. Э. Саттарова**<sup>1</sup>, мл. науч. сотр.,  
 telmancyber@rambler.ru

<sup>1</sup> Институт кибернетики НАН Азербайджана, Баку

<sup>2</sup> СКБ Института кибернетики НАН Азербайджана, Баку

## Помехотехнологии индикации и идентификации скрытого периода перехода объекта из нормального в аварийное состояние

*Анализируются трудности обнаружения системой контроля начальной стадии перехода объекта из нормального состояния в аварийное. Предлагаются различные варианты корреляционных помехотехнологий для надежной индикации начальной стадии зарождения дефектов для случаев, когда они отражаются в виде помех сигналов, получаемых от соответствующих датчиков. Рассматривается возможность идентификации места и характера перехода многомерных объектов контроля из нормального в аварийное состояние с помощью матриц, сформированных из различных надежных помехоиндикаторов.*

**Ключевые слова:** случайный сигнал, помеха, зашумленный сигнал, индикатор, техническое состояние, объект, контроль

### Введение

Установлено, что во время эксплуатации технических объектов появляются дефекты от усталости, износа, коррозии и т. д., причем начиная с момента их зарождения до момента приобретения явно выраженной формы, характеристики полезных

сигналов и помех, получаемые на выходах соответствующих датчиков, непрерывно меняются, и нередко помеха становится носителем ценной информации [1, 2]. Когда дефекты приобретают явно выраженную форму, искомые оценки постепенно стабилизируются. Но при этом нарушение условия

нормальности закона распределения и отсутствия корреляции между полезным сигналом и помехой продолжается. К сожалению, в традиционных технологиях недостаточно учтена указанная выше специфика физических процессов формирования реальных сигналов.

### Постановка задачи

Многочисленные аварии с катастрофическими последствиями таких технических объектов, как тепловые и атомные электростанции, крупнотоннажные нефтехимические комплексы, глубоководные стационарные морские платформы и гидротехнические сооружения, магистральные нефтегазопроводы, аварии авиалайнеров, ошибки прогнозирования землетрясений в сейсмических станциях, ошибки в системах диагностирования заболеваний и т. д. раньше связывались с ненадежностью элементной базы технических средств. Теперь, когда надежность как отдельных технических элементов базы, так и всей системы в целом многократно возросла, вероятность возникновения аварий по вине информационных систем уменьшилась незначительно. Проведенные исследования [1, 2] показали, что одна из основных причин принятия информационными системами неадекватных решений в возникших ситуациях связана с изменением характеристик сигналов  $g(i\Delta t) = x(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)$ , получаемых на выходах соответствующих датчиков [1]. Здесь и далее произвольный сигнал будет рассматриваться в дискретной форме в виде последовательности значений в точках  $t_i = i\Delta t$ ,  $i$  — номер шага,  $\Delta t$  — шаг квантования.

Помимо информации, которую несет полезный сигнал  $x(i\Delta t)$ , также целесообразно извлечение информации из помехи  $\varepsilon(i\Delta t)$ . Очевидно, что для надежной и безошибочной индикации начала процесса появления дефектов необходимо создание эффективных технологий анализа зашумленных сигналов  $g(i\Delta t)$  для случая, когда оценки их характеристик меняются во времени, и помеха является носителем ценной информации. Рассмотрим один из вариантов такой технологии.

Допустим, что в период времени  $T_0$  до начала процесса зарождения дефекта имеют место классические условия и выполняются соответствующие равенства:

$$D_{\varepsilon T_0} \approx 0, r_{x\varepsilon T_0} \approx 0, \\ W_{T_0} [g(i\Delta t)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi D(g)}} e^{-\frac{(g-m_g)^2}{2D(g)}}; \quad (1)$$

в интервалы времени первой ( $T_1$ ), второй ( $T_2$ ), третьей ( $T_3$ ) стадий процесса зарождения дефекта,

а также в интервалы времени явно выраженной формы дефекта  $T_4, T_5$  имеют место соотношения:

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{\varepsilon T_1} \neq D_{\varepsilon T_0}; W_{T_1} [g(i\Delta t)] \neq W_{T_0} [g(i\Delta t)]; \\ r_{x\varepsilon T_1} \neq r_{x\varepsilon T_0}; r_{x\varepsilon T_1} > 0; \\ D_{\varepsilon T_2} \neq D_{\varepsilon T_1}; W_{T_2} [g(i\Delta t)] \neq W_{T_1} [g(i\Delta t)]; \\ r_{x\varepsilon T_2} \neq r_{x\varepsilon T_1}; \\ D_{\varepsilon T_3} \neq D_{\varepsilon T_2}; W_{T_3} [g(i\Delta t)] \neq W_{T_2} [g(i\Delta t)]; \\ r_{x\varepsilon T_3} \neq r_{x\varepsilon T_2}; \\ D_{\varepsilon T_4} \neq D_{\varepsilon T_3}; W_{T_4} [g(i\Delta t)] \neq W_{T_3} [g(i\Delta t)]; \\ r_{x\varepsilon T_4} \neq r_{x\varepsilon T_3}; \\ D_{\varepsilon T_5} \neq D_{\varepsilon T_4}; W_{T_5} [g(i\Delta t)] \approx W_{T_4} [g(i\Delta t)]; \\ r_{x\varepsilon T_5} \approx r_{x\varepsilon T_4}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $W_{T_0} [g(i\Delta t)], W_{T_1} [g(i\Delta t)], W_{T_2} [g(i\Delta t)], W_{T_3} [g(i\Delta t)], W_{T_4} [g(i\Delta t)], W_{T_5} [g(i\Delta t)]$  — законы распределения сигнала  $g(i\Delta t)$ ;  $D_{\varepsilon T_0}, D_{\varepsilon T_1}, D_{\varepsilon T_2}, D_{\varepsilon T_3}, D_{\varepsilon T_4}, D_{\varepsilon T_5}$  — оценки дисперсии помехи  $\varepsilon(i\Delta t)$ ;  $r_{x\varepsilon T_0}, r_{x\varepsilon T_1}, r_{x\varepsilon T_2}, r_{x\varepsilon T_3}, r_{x\varepsilon T_4}, r_{x\varepsilon T_5}$  — оценки коэффициента корреляции между полезным сигналом  $x(i\Delta t)$  и помехой  $g(i\Delta t)$  в периоды времени  $T_0, T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$ ;  $D(g)$  — дисперсия сигнала  $g(i\Delta t)$ ;  $m_g$  — математическое ожидание сигнала  $g(i\Delta t)$ . Очевидно, что при этом в момент возникновения процесса зарождения дефекта сигналы  $g(i\Delta t)$  из временного интервала  $T_0$  переходят во временные интервалы  $T_1, T_2$  или  $T_3$ , и начинается скрытый период изменения технического состояния объекта. При этом начинают нарушаться известные классические условия, т. е. имеют место равенства (2), и из-за этого при применении традиционных технологий статистического анализа зашумленных случайных сигналов искомые оценки определяются с некоторой погрешностью. По этой причине в системе контроля не всегда удастся обнаружить начальную стадию процесса зарождения дефекта [1, 2]. Следовательно, необходимо создать технологии, позволяющие уловить момент перехода сигнала  $g(i\Delta t)$  из временного отрезка  $T_0$  во все временные отрезки  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$ .

### Корреляционные индикаторы начала зарождения дефекта

Для решения задачи выявления начала микроизменений технического состояния объектов рассмотрим возможность создания корреляционных индикаторов. На практике согласно выражению (2) зарождению дефекта на реальных объектах отвечает переход сигнала  $g(i\Delta t)$  на выходах датчиков из

временного интервала  $T_0$  в интервал времени  $T_1$  и происходит нарушение нормальности закона распределения  $W_{T_0}[g(i\Delta t)]$  и других классических условий. Вследствие этого как автокорреляционные  $R_{gg}(\mu)$ ,  $R_{\dot{g}\dot{g}}(\mu)$ , так и взаимно корреляционные функции  $R_{g\eta}(\mu)$ ,  $R_{\dot{g}\dot{\eta}}(\mu)$  сигнала  $g(i\Delta t)$  и другого зашумленного сигнала  $\eta(i\Delta t)$ \* получаются с различными погрешностями, и дисперсия помехи отличается от нуля. Однако с увеличением временного сдвига между  $g(i\Delta t)$  и  $g((i + \mu)\Delta t)$ , между  $g(i\Delta t)$  и  $\eta((i + \mu)\Delta t)$  полученные оценки оказываются равными нулю. При этом погрешности оценок  $R_{gg}(\mu)$  и  $R_{g\eta}(\mu)$  нецентрированных сигналов принимают максимальное, а погрешности оценок  $R_{\dot{g}\dot{g}}(\mu)$ ,  $R_{\dot{g}\dot{\eta}}(\mu)$  центрированных сигналов — минимальное значения. Если этот временной сдвиг обозначить  $\mu'$ , тогда между ними будут иметь место следующие очевидные соотношения:

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu = \mu') - R_{\dot{g}\dot{g}}(\mu = \mu') &= \lambda_{\dot{g}\dot{g}}(\mu = \mu'); \\ R_{g\eta}(\mu = \mu') - R_{\dot{g}\dot{\eta}}(\mu = \mu') &= \lambda_{\dot{g}\dot{\eta}}(\mu = \mu'), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $R_{gg}(\mu) = \frac{1}{N} \sum g(i\Delta t)g((i + \mu)\Delta t)$ ;

$$\begin{aligned} R_{\dot{g}\dot{g}}(\mu) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{g}(i\Delta t)\dot{g}((i + \mu)\Delta t); \\ R_{g\eta}(\mu) &= \frac{1}{N} \sum g(i\Delta t)\eta((i + \mu)\Delta t); \end{aligned} \quad (4)$$

$$R_{\dot{g}\dot{\eta}}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{g}(i\Delta t)\dot{\eta}((i + \mu)\Delta t);$$

$\dot{g}(t) = g(t) - m_g$ ;  $\dot{\eta}(t) = \eta(t) - m_\eta$ ;  $m_g, m_\eta$  — математические ожидания  $g(t), \eta(t)$ .

Из литературы [1—6] известно, что при нормальном состоянии объекта разности (3) равны нулю, причем при изменении технического состояния в силу неравенств (2) они резко меняются. Следовательно, величины  $\lambda_{\dot{g}\dot{g}}(\mu = \mu')$ ,  $\lambda_{\dot{g}\dot{\eta}}(\mu = \mu')$  могут быть использованы как индикаторы микроизменений в техническом состоянии контролируемых объектов. Рассмотрим этот вопрос более подробно. Из равенства (2) следует, что в начале зарождения дефекта для оценок, полученных по выражениям (3) и (4), в интервалах времени  $T_0, T_1$  при  $\mu = \mu'$  будет иметь место неравенство

$$R_{gg}^{T_0}(\mu = \mu') - R_{gg}^{T_1}(\mu = \mu') \neq 0.$$

Это связано с тем, что погрешности оценок  $R_{gg}^{T_0}(\mu = \mu')$  и  $R_{gg}^{T_1}(\mu = \mu')$  формируются из  $N^+$  сумм погрешностей произведений  $\dot{g}(i\Delta t)\dot{g}((i + \mu')\Delta t)$  с положительными знаками

$$R_{gg}^+(\mu = \mu') = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N^+} \dot{g}(i\Delta t)\dot{g}((i + \mu')\Delta t)$$

\* Здесь  $\eta(i\Delta t)$  представляет собой суперпозицию соответствующего полезного сигнала и помехи.

и из  $N^-$  сумм аналогичных погрешностей произведений с отрицательными знаками

$$R_{gg}^-(\mu = \mu') = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N^-} \dot{g}(i\Delta t)\dot{g}((i + \mu')\Delta t).$$

Только при  $\mu = \mu'$  между  $\dot{g}(i\Delta t)$  и  $\dot{g}((i + \mu')\Delta t)$  погрешности  $R_{gg}^+(\mu')$  и  $R_{gg}^-(\mu')$  компенсируются, так как в периоде времени  $T_0$  имеет место равенство

$$R_{gg}^+(\mu = \mu') \approx R_{gg}^-(\mu = \mu'). \quad (5)$$

В момент перехода  $g(i\Delta t)$  из временного интервала  $T_0$  во временной интервал  $T_1$  вместо равенства (5) имеет место неравенство

$$R_{gg}^+(\mu = \mu') \neq R_{gg}^-(\mu = \mu').$$

В то же время в аналогичном выражении для нецентрированных сигналов  $g(i\Delta t)$  все вышеуказанные погрешности оценок  $R_{gg}^{T_0}(\mu')$ , возникающие от перехода сигнала  $g(i\Delta t)$  во временные интервалы  $T_1, T_2$  или  $T_3$ , суммируются, и оценка  $R_{gg}^{T_1}(\mu')$  получается с ощутимыми погрешностями. В результате имеют место неравенства

$$\begin{aligned} R_{gg}^{T_0}(\mu') \neq R_{gg}^{T_1}(\mu'), \quad R_{gg}^{T_1}(\mu') \neq R_{gg}^{T_2}(\mu'), \\ R_{gg}^{T_2}(\mu') \neq R_{gg}^{T_3}(\mu'). \end{aligned} \quad (6)$$

Благодаря этому получают разности

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{\dot{g}\dot{g}}^{T_0 T_1}(\mu') &= R_{\dot{g}\dot{g}}^{T_0}(\mu') - R_{\dot{g}\dot{g}}^{T_1}(\mu'); \\ \lambda_{\dot{g}\dot{g}}^{T_1 T_1}(\mu') &= R_{\dot{g}\dot{g}}^{T_1}(\mu') - R_{\dot{g}\dot{g}}^{T_1}(\mu'); \\ \lambda_{\dot{g}\dot{g}}^{T_0 T_1}(\mu') &= R_{\dot{g}\dot{g}}^{T_0}(\mu') - R_{\dot{g}\dot{g}}^{T_1}(\mu'), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

которые также можно использовать для индикации изменений в техническом состоянии объекта.

Понятно, что аналогичные выражения можно написать и для оценок взаимно корреляционных функций:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{\dot{g}\dot{\eta}}^{T_0 T_1}(\mu') &= R_{\dot{g}\dot{\eta}}^{T_0}(\mu') - R_{\dot{g}\dot{\eta}}^{T_1}(\mu'); \\ \lambda_{\dot{g}\dot{\eta}}^{T_1 T_1}(\mu') &= R_{\dot{g}\dot{\eta}}^{T_1}(\mu') - R_{\dot{g}\dot{\eta}}^{T_1}(\mu'); \\ \lambda_{\dot{g}\dot{\eta}}^{T_0 T_1}(\mu') &= R_{\dot{g}\dot{\eta}}^{T_0}(\mu') - R_{\dot{g}\dot{\eta}}^{T_1}(\mu'), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

которые при незначительном изменении характеристик сигнала мгновенно меняются, что позволяет их также использовать как индикаторы начала микроизменений в техническом состоянии объекта контроля.

В качестве индикатора также может быть использована разность изменения оценок характеристик для нецентрированных сигналов  $g(i\Delta t)$  во временных интервалах  $T_0$  и  $T_1$ , т. е.

$$\begin{aligned} \lambda_{gg}^{T_0 T_1}(\mu') &= R_{gg}^{T_0}(\mu') - R_{gg}^{T_1}(\mu'); \\ \lambda_{g\eta}^{T_0 T_1}(\mu') &= R_{g\eta}^{T_0}(\mu') - R_{g\eta}^{T_1}(\mu'). \end{aligned} \quad (9)$$

Из выражений (1), (2) следует, что при зарождении дефекта, т. е. при микроизменениях технического состояния объекта, дисперсия помехи  $D_\epsilon$  ме-

няется в первую очередь. В связи с этим ее также можно использовать в качестве одного из надежных индикаторов и вычислять по выражению [1, 2, 7, 8]

$$D_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\dot{g}^2(i\Delta t) + \dot{g}(i\Delta t)\dot{g}((i+2)\Delta t) - 2\dot{g}(i\Delta t)\dot{g}((i+1)\Delta t)]. \quad (10)$$

При этом по формуле

$$D_x = \frac{1}{N} \sum g^2(i\Delta t) - D_\varepsilon$$

можно определить дисперсию полезного сигнала, которая по истечении временных интервалов  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$  также меняется.

### Индикация зарождения дефекта по робастным оценкам нормированных корреляционных функций технологических параметров

В литературе [3–6] для устранения влияния помехи на оценки корреляционных функций предлагают использовать их нормированные оценки. Проведенные исследования показали, что при их применении без обеспечения робастности вычислений надежность индикации зарождения дефекта не гарантируется. Поэтому для использования оценок нормированных автокорреляционных и взаимно корреляционных функций как для индикации, так и для идентификации необходимо обеспечить робастность их оценок при всех значениях временного сдвига. Для этого предлагается следующая технология определения робастных оценок нормированных автокорреляционных и взаимно корреляционных функций. Вычисляются:

1) оценки нормированных автокорреляционных и взаимно корреляционных функций:

$$r_{\dot{g}\dot{g}}^R(\mu) = R_{\dot{g}\dot{g}}(\mu)/D(g); \quad (11)$$

$$r_{\dot{g}_1\dot{g}_2}^R(\mu) = R_{\dot{g}_1\dot{g}_2}(\mu)/\sqrt{D(g_1)D(g_2)}, \quad (12)$$

где  $D(g) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{g}_2(i\Delta t)$ ;  $D(g_1) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{g}_1(i\Delta t)\dot{g}_1(i\Delta t)$ ;

$$D(g_2) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{g}_2(i\Delta t)\dot{g}_2(i\Delta t);$$

2) дисперсии  $D_\varepsilon, D_{\varepsilon_1}, D_{\varepsilon_2}$  помех

$\varepsilon(i\Delta t), \varepsilon_1(i\Delta t), \varepsilon_2(i\Delta t)$  по выражению (10);

3) робастные оценки нормированных автокорреляционной и взаимно корреляционной функций:

$$r_{\dot{g}\dot{g}}^R(\mu) = R_{\dot{g}\dot{g}}(\mu)/(D(g) - D_\varepsilon); \quad (13)$$

$$r_{\dot{g}_1\dot{g}_2}^R(\mu) = R_{\dot{g}_1\dot{g}_2}(\mu)/\sqrt{(D(g_1) - D_{\varepsilon_1})\sqrt{(D(g_2) - D_{\varepsilon_2})}} \quad (14)$$

или

$$r_{\dot{g}\dot{g}}^R(\mu) = \begin{cases} 1 & \text{при } \mu = 0; \\ \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\dot{g}(i\Delta t)\dot{g}((i+\mu)\Delta t)]}{A(g)} & \text{при } \mu \neq 0; \end{cases} \quad (15)$$

$$r_{\dot{g}_1\dot{g}_2}^R(\mu) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{g}_1(i\Delta t)\dot{g}_2((i+\mu)\Delta t)}{A(g_1)A(g_2)}, \quad (16)$$

где

$$A(g) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [2\dot{g}(i\Delta t)\dot{g}((i+1)\Delta t) - \dot{g}(i\Delta t)\dot{g}((i+2)\Delta t)];$$

$$A(g_1) =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [2\dot{g}_1(i\Delta t)\dot{g}_1((i+1)\Delta t) - \dot{g}_1(i\Delta t)\dot{g}_1((i+2)\Delta t)]};$$

$$A(g_2) =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [2\dot{g}_2(i\Delta t)\dot{g}_2((i+1)\Delta t) - \dot{g}_2(i\Delta t)\dot{g}_2((i+2)\Delta t)]}.$$

Таким образом, применение разработанной технологии позволяет получить робастные оценки нормированных автокорреляционных и взаимно корреляционных функций. Предлагаемая технология обеспечивает робастность оценок даже в таком непростом случае, когда классические условия не выполняются ни для полезных сигналов, ни для помех. Поэтому очевидно, что робастные нормированные оценки корреляционных функций можно также использовать как индикаторы начала появления дефекта. Естественно, что в момент времени  $T_0$ , когда нет дефекта, при временном сдвиге  $\mu'$  значения робастных нормированных автокорреляционных и взаимно корреляционных функций равны нулю:

$$r_{\dot{g}\dot{g}}^{RT_0}(\mu') = 0, \quad r_{\dot{g}_1\dot{g}_2}^{RT_0}(\mu') = 0.$$

Очевидно, что в момент возникновения процесса зарождения дефекта, когда сигналы из временного интервала  $T_0$  переходят во временной интервал  $T_1$ , между оценками робастных нормированных корреляционных функций также будут выполняться соотношения, аналогичные формулам (7), (9), т. е.

$$\lambda_{\dot{g}\dot{g}}^{RT_0T_1}(\mu = \mu') = r_{\dot{g}\dot{g}}^{RT_0}(\mu = \mu') - r_{\dot{g}\dot{g}}^{RT_1}(\mu = \mu'); \quad (17)$$

$$\lambda_{\dot{g}_1\dot{g}_2}^{RT_0T_1}(\mu = \mu') = r_{\dot{g}_1\dot{g}_2}^{RT_0}(\mu = \mu') - r_{\dot{g}_1\dot{g}_2}^{RT_1}(\mu = \mu'). \quad (18)$$

Следовательно, благодаря обеспечению робастности разности (17), (18) оценок нормированных корреляционных функций в интервалах  $T_0, T_1$  обеспечиваются большую достоверность и надежность ин-



дикаторов изменения технического состояния объектов по сравнению с формулами (6)—(9).

### Идентификация перехода сложных объектов из нормального в аварийное состояние

В вышеуказанных объектах зарождение дефекта в некоторых случаях способствует скрытому переходу их из нормального состояния в аварийное. Поэтому в системах одновременно с мониторингом и индикацией начала зарождения дефекта также целесообразно решать задачи идентификации их технического состояния. Для этой цели, прежде всего, требуется формирование соответствующих корреляционных матриц, так как решение многочисленных важнейших задач идентификации как статики, так и динамики сводится к численному решению матричных корреляционных уравнений типа

$$R_{\dot{X}\dot{X}}(0)B = R_{\dot{X}\dot{Y}}(0); \quad (19)$$

$$R_{\dot{X}\dot{Y}}(\mu) = R_{\dot{X}\dot{X}}(\mu)W(\mu), \quad \mu = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, (N-1)\Delta t, \quad (20)$$

где  $B$  — вектор-столбец коэффициентов уравнения статики;  $W(\mu)$  — вектор-столбец импульсных переходных функций [1, 2, 7, 8];

$$R_{\dot{X}\dot{X}}(0) = \begin{pmatrix} R_{\dot{X}_1\dot{X}_1}(0) & R_{\dot{X}_1\dot{X}_2}(0) & \dots & R_{\dot{X}_1\dot{X}_n}(0) \\ R_{\dot{X}_2\dot{X}_1}(0) & R_{\dot{X}_2\dot{X}_2}(0) & \dots & R_{\dot{X}_2\dot{X}_n}(0) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{\dot{X}_n\dot{X}_1}(0) & R_{\dot{X}_n\dot{X}_2}(0) & \dots & R_{\dot{X}_n\dot{X}_n}(0) \end{pmatrix}; \quad (21)$$

$$R_{\dot{X}\dot{Y}}(0) = [R_{\dot{X}_1\dot{Y}}(0) \ R_{\dot{X}_2\dot{Y}} \ \dots \ R_{\dot{X}_n\dot{Y}}]^T; \quad (22)$$

$$R_{\dot{X}\dot{X}}(\mu) = \begin{pmatrix} R_{\dot{X}\dot{X}}(0) & R_{\dot{X}\dot{X}}(\Delta t) & \dots & R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-1)\Delta t] \\ R_{\dot{X}\dot{X}}(\Delta t) & R_{\dot{X}\dot{X}}(0) & \dots & R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-2)\Delta t] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-1)\Delta t] & R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-2)\Delta t] & \dots & R_{\dot{X}\dot{X}}(0) \end{pmatrix}; \quad (23)$$

$$R_{\dot{X}\dot{Y}}(\mu) = [R_{\dot{X}\dot{Y}}(0) \ R_{\dot{X}\dot{Y}}(\Delta t) \ \dots \ R_{\dot{X}\dot{Y}}[(N-1)\Delta t]]^T; \quad (24)$$

$$W(\mu) = [W(0) \ W(\Delta t) \ \dots \ W((N-1)\Delta t)]^T. \quad (25)$$

Так как реальные сигналы  $g_i(t)$ ,  $\eta(t)$  состоят из смеси полезных сигналов  $X_i(t)$ ,  $Y(t)$  и случайных помех  $\varepsilon_i(t)$ ,  $\varphi(t)$ , то вместо корреляционных матриц (21)—(24) полезных сигналов получают аналогичные матрицы зашумленных сигналов  $R_{\dot{g}\dot{g}}(0)$ ,  $R_{\dot{g}\dot{g}}(\mu)$ ,  $R_{\dot{g}\dot{\eta}}(\mu)$ . При этом элементы матриц  $R_{\dot{g}\dot{g}}(0)$ ,  $R_{\dot{g}\dot{g}}(\mu)$  зашумленных сигналов  $g_i(t)$ ,  $\eta(t)$  совпадают с элементами матриц  $R_{\dot{X}\dot{X}}(0)$ ,  $R_{\dot{X}\dot{X}}(\mu)$  полезных сигналов  $X_i(k\Delta t)$ ,  $Y(k\Delta t)$ , за исключением

элементов главной диагонали, которые содержат в виде погрешностей дисперсии  $D(\varepsilon_i)$  помех  $\varepsilon(i\Delta t)$ . Элементы же вектор-столбцов  $R_{\dot{g}\dot{\eta}}(0)$ ,  $R_{\dot{g}\dot{\eta}}(\mu)$  зашумленных сигналов  $g_i(t)$ ,  $\eta(t)$  совпадают с элементами матриц  $R_{\dot{X}\dot{Y}}(0)$ ,  $R_{\dot{X}\dot{Y}}(\mu)$  полезных сигналов  $X_i(k\Delta t)$ ,  $Y(k\Delta t)$ . В существующей литературе [3—6] считается, что для устранения влияния дисперсий  $D(\varepsilon_i)$  помех  $\varepsilon_i(t)$  в диагональных элементах матриц  $R_{\dot{g}\dot{g}}(0)$ ,  $R_{\dot{g}\dot{g}}(\mu)$  на их обусловленность целесообразно перейти к нормированным корреляционным матрицам  $r_{\dot{g}\dot{g}}(0)$ ,  $r_{\dot{g}\dot{\eta}}(0)$ ,  $r_{\dot{g}\dot{g}}(\mu)$ ,  $r_{\dot{g}\dot{\eta}}(\mu)$ , используя для каждого элемента матриц формулы преобразований (11), (12). При этом, если сравнить нормированные матрицы  $r_{\dot{X}\dot{X}}(0)$ ,  $r_{\dot{X}\dot{X}}(\mu)$  входных полезных сигналов с нормированными матрицами  $r_{\dot{g}\dot{g}}(0)$ ,  $r_{\dot{g}\dot{g}}(\mu)$  входных зашумленных сигналов, то очевидно, что диагональные элементы нормированных корреляционных матриц зашумленных сигналов совпадают с диагональными элементами нормированных корреляционных матриц  $r_{\dot{X}\dot{X}}(0)$ ,  $r_{\dot{X}\dot{X}}(\mu)$  полезных сигналов  $X_i(i\Delta t)$  и равны единице. Таким образом, при переходе к нормированным корреляционным матрицам устраняется влияние дисперсий  $D(\varepsilon_i)$  помех  $\varepsilon_i(i\Delta t)$  на диагональные элементы нормированных корреляционных матриц  $r_{\dot{g}\dot{g}}(0)$ ,  $r_{\dot{g}\dot{g}}(\mu)$  зашумленных сигналов. Однако при этом остальные элементы нормированных корреляционных матриц  $r_{\dot{g}\dot{g}}(0)$ ,  $r_{\dot{g}\dot{g}}(\mu)$ , а также все элементы матриц  $r_{\dot{g}\dot{\eta}}(0)$ ,  $r_{\dot{g}\dot{\eta}}(\mu)$  зашумленных сигналов в результате преобразования содержат в подкоренном выражении знаменателя помимо дисперсий  $D(x_i)$ ,  $D(y)$  полезных сигналов также дисперсии  $D(\varepsilon_i)$ ,  $D(\varphi)$  помех  $\varepsilon_i(i\Delta t)$ ,  $\varphi(i\Delta t)$ . Таким образом, процедура нормирования только искажает значения элементов нормированных корреляционных матриц, за исключением элементов главной диагонали матриц  $r_{\dot{g}\dot{g}}(0)$ ,  $r_{\dot{g}\dot{g}}(\mu)$  и не дает желаемого эффекта. Поэтому для решения проблемы исключения влияния дисперсий  $D(\varepsilon_i)$ ,  $D(\varphi)$  помех  $\varepsilon_i(i\Delta t)$ ,  $\varphi(i\Delta t)$  и получения матриц, совпадающих с нормированными корреляционными матрицами полезных сигналов, разработана технология получения робастных нормированных корреляционных матриц  $r_{\dot{X}\dot{X}}^R(0)$ ,  $r_{\dot{X}\dot{Y}}^R(0)$ ,  $r_{\dot{X}\dot{X}}^R(\mu)$ ,  $r_{\dot{X}\dot{Y}}^R(\mu)$ , согласно которой каждый элемент такой матрицы вычисляется по формулам (13)—(16). Таким образом, вместо матричных уравнений (19), (20) получаются матричные уравнения вида

$$r_{\dot{X}\dot{X}}^R(0)B = r_{\dot{X}\dot{Y}}^R(0); \quad (26)$$

$$r_{\dot{X}\dot{X}}^R(\mu)W(\mu) = r_{\dot{X}\dot{Y}}^R(\mu), \quad (27)$$

по которым можно решать задачи идентификации. Однако для реальных сложных объектов даже решение матричных уравнений типа (26), (27) является достаточно трудоемкой задачей, и при решении задачи мониторинга, контроля, диагностики применение такого подхода во многих случаях оказывается неоправданным. Поэтому для успешного решения задач как индикации, так и идентификации начала перехода этих объектов из нормального состояния в аварийное целесообразно использовать матрицы, по которым легко и с высокой степенью надежности можно получить полную картину, отражающую их техническое состояние. Рассмотрим один из возможных вариантов такого решения этой задачи. Для случая, когда объект имеет  $n$  входов и  $m$  выходов, понятно, что для каждого входного  $g_1(i\Delta t)$ ,  $g_2(i\Delta t)$ , ...,  $g_n(i\Delta t)$  и выходного  $\eta_1(i\Delta t)$ ,  $\eta_2(i\Delta t)$ , ...,  $\eta_m(i\Delta t)$  сигналов следует найти по формулам (6)–(9), (17), (18) соответствующие корреляционные индикаторы, а затем по ним сформировать матричные индикаторы типа

$$\begin{aligned} W[r_{gg}^R(\mu')] &= \\ &= \begin{vmatrix} r_{g_1 g_1}^R(\mu') & r_{\eta_1 \eta_1}^R(\mu') & r_{g_1 \eta_1}^R(\mu') & r_{g_1 \eta_2}^R(\mu') & \dots & r_{g_1 \eta_k}^R(\mu') \\ r_{g_2 g_2}^R(\mu') & r_{\eta_2 \eta_2}^R(\mu') & r_{g_2 \eta_1}^R(\mu') & r_{g_2 \eta_2}^R(\mu') & \dots & r_{g_2 \eta_k}^R(\mu') \\ r_{g_3 g_3}^R(\mu') & r_{\eta_3 \eta_3}^R(\mu') & r_{g_3 \eta_1}^R(\mu') & r_{g_3 \eta_2}^R(\mu') & \dots & r_{g_3 \eta_k}^R(\mu') \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{g_k g_k}^R(\mu') & r_{\eta_k \eta_k}^R(\mu') & r_{g_k \eta_1}^R(\mu') & r_{g_k \eta_2}^R(\mu') & \dots & r_{g_k \eta_k}^R(\mu') \end{vmatrix}; \\ W[\lambda^{RT_0 T_1}(\mu')] &= \\ &= \begin{vmatrix} \lambda_{g_1 g_1}^{RT_0 T_1}(\mu') & \lambda_{\eta_1 \eta_1}^{RT_0 T_1}(\mu') & \lambda_{g_1 \eta_1}^{RT_0 T_1}(\mu') & \lambda_{g_1 \eta_2}^{RT_0 T_1}(\mu') & \dots & \lambda_{g_1 \eta_k}^{RT_0 T_1}(\mu') \\ \lambda_{g_2 g_2}^{RT_0 T_1}(\mu') & \lambda_{\eta_2 \eta_2}^{RT_0 T_1}(\mu') & \lambda_{g_2 \eta_1}^{RT_0 T_1}(\mu') & \lambda_{g_2 \eta_2}^{RT_0 T_1}(\mu') & \dots & \lambda_{g_2 \eta_k}^{RT_0 T_1}(\mu') \\ \lambda_{g_3 g_3}^{RT_0 T_1}(\mu') & \lambda_{\eta_3 \eta_3}^{RT_0 T_1}(\mu') & \lambda_{g_3 \eta_1}^{RT_0 T_1}(\mu') & \lambda_{g_3 \eta_2}^{RT_0 T_1}(\mu') & \dots & \lambda_{g_3 \eta_k}^{RT_0 T_1}(\mu') \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{g_k g_k}^{RT_0 T_1}(\mu') & \lambda_{\eta_k \eta_k}^{RT_0 T_1}(\mu') & \lambda_{g_k \eta_1}^{RT_0 T_1}(\mu') & \lambda_{g_k \eta_2}^{RT_0 T_1}(\mu') & \dots & \lambda_{g_k \eta_k}^{RT_0 T_1}(\mu') \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

Легко можно убедиться в том, что эти матрицы достаточно информативны. Когда состояние объекта нормальное, все элементы матрицы будут равны нулю. Как только в каком-то узле начнется процесс зарождения дефекта, то соответствующий элемент будет отличаться от нуля. Тогда по номеру столбца и строки элемента матрицы, который отличен от нуля, можно определить, т. е. идентифицировать место и характер неисправности, приводящей к переходу объекта из нормального в аварийное состояние.

Понятно, что матрицы, аналогичные матрицам  $W[r^R(\mu')]$ ,  $W[\lambda^{RT_0 T_1}(\mu')]$ , можно также получить на основании выражений (7)–(9), используя в качестве индикаторов величины  $\lambda_{gg}^{T_0 T_1}(\mu')$ ,  $\lambda_{gg}^{T_1 T_1}(\mu')$ ,  $\lambda_{g\eta}^{T_0 T_1}(\mu')$ ,  $\lambda_{g\eta}^{T_1 T_1}(\mu')$ ,  $\lambda_{\eta\eta}^{T_0 T_1}(\mu')$ ,  $\lambda_{\eta\eta}^{T_1 T_1}(\mu')$ ,  $\lambda_{g\eta}^{T_0 T_1}(\mu')$ ,  $\lambda_{g\eta}^{T_1 T_1}(\mu')$ ,  $\lambda_{\eta g}^{T_0 T_1}(\mu')$ ,  $\lambda_{\eta g}^{T_1 T_1}(\mu')$ .

$\lambda_{g\eta}^{T_0 T_1}(\mu')$ . В результате получатся матричные индикаторы в виде  $W[\lambda_{gg}^{T_0 T_1}(\mu')]$ ,  $W[\lambda_{gg}^{T_1 T_1}(\mu')]$ ,  $W[\lambda_{g\eta}^{T_0 T_1}(\mu')]$ ,  $W[\lambda_{g\eta}^{T_1 T_1}(\mu')]$ ,  $W[\lambda_{\eta\eta}^{T_0 T_1}(\mu')]$ ,  $W[\lambda_{\eta\eta}^{T_1 T_1}(\mu')]$ . По этим матричным индикаторам можно сформировать совокупный матричный индикатор  $W\{W[r^R(\mu')]$ ,  $W[\lambda^{RT_0 T_1}(\mu')]$ ,  $W[\lambda_{gg}^{T_0 T_1}(\mu')]$ ,  $W[\lambda_{gg}^{T_1 T_1}(\mu')]$ ,  $W[\lambda_{g\eta}^{T_0 T_1}(\mu')]$ ,  $W[\lambda_{g\eta}^{T_1 T_1}(\mu')]$ , ...}. Применение подобного совокупного матричного индикатора позволит многократно повысить степень надежности мониторинга индикации и идентификации перехода объекта из нормального состояния в аварийное.

### Заключение

Применение предложенной технологии выявления скрытого периода перехода объекта из нормального в аварийное состояние в системах мониторинга, контроля, диагностики и управления позволит значительно уменьшить число катастрофических аварий на морских нефтегазовых месторождениях, нефтехимических комбинатах, тепловых и атомных электростанциях, железнодорожном и морском транспорте, в авиации и т. д., которые происходят из-за запоздалости диагностики в современных информационных системах. Кроме того, появится возможность значительно уменьшить объем материальных и человеческих потерь от землетрясений в городах, расположенных в сейсмоактивных регионах, так как при этом население может быть заблаговременно оповещено о предстоящем землетрясении с тем, чтобы оно успело покинуть помещения и перебраться в безопасные места.

### Список литературы

1. **Aliyev T.** Digital Noise Monitoring of Defect Origin. London: Springer-Verlag, 2007. 235 p.
2. **Aliyev T.** Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003. 199 p.
3. **Collacott R. A.** Structural integrity monitoring. Chapman & Hall, 1985, 474 p.
4. **Bendat Julius S. and Allan G.** Piersol. Random Data: Analysis & Measurement Procedures. Wiley-Interscience, 2000 XVII, 594 p.
5. **Bulychev Yu. G. and Lapsar A. P.** Technical object monitoring and control under conditions of structural uncertainty with an extended measurement model // Measurement Techniques. New York: Springer, 2009. V. 52. N 3. P. 237–249.
6. **Wang Lihui, Gao Robert X.** Condition monitoring and control for intelligent manufacturing // Springer Series in Advanced Manufacturing. 2006. V. XX. 399 p.
7. **Aliyev T. A., Musaeva N. F.** Algorithms for Improving Adequacy of Statistical Identification // Journal of Computer and Systems Sciences International. Interperiodica publishing. 1997. V. 36. N 3. P. 363–369.
8. **Aliyev T. A., Musaeva N. F.** An algorithm for Eliminating Microerrors of Noise in the Solution of Statistical Dynamics Problems // Automation and Remote Control. 1998. V. 59. N 5. P. 679–688.

# К 80-летию МГТУ "СТАНКИН": АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 621.86/.87

**А. В. Логинов<sup>1, 3</sup>,**

**Ю. В. Подураев**, д-р техн. наук, проф.,

**К. Харцбекер<sup>2</sup>**, др-инж.,

**Ш. Иленфельдт<sup>2</sup>**, дипл-инж.,

<sup>1</sup> Московский государственный  
технологический университет "Станкин",

<sup>2</sup> Фраунгоферский институт станков  
и обработки давлением, Германия,

<sup>3</sup> Департамент корпоративных технологий  
компании "Сименс", Россия,  
poduraev@stankin.ru

## Оптимизация динамических свойств многокоординатных обрабатывающих центров с гибридной кинематической структурой

*Рассмотрены особенности моделирования динамики и оптимального планирования траектории перемещения инструмента для нового класса станков с гибридной (последовательно-параллельной) кинематической структурой, которая отличается от стандартных компоновок наличием избыточных приводов и избыточных степеней подвижности. Практическая применимость предложенных методов иллюстрируется на примере обрабатывающего центра Duparod, предназначенного для фрезерования крупногабаритных деталей.*

**Ключевые слова:** параллельная и гибридная структуры, кинематическая и приводная избыточность, оптимальное управление

### Новые кинематические решения в современном станкостроении

История развития станкостроения и беглый анализ типов кинематических схем современных станков приводят к противоречивым выводам. С одной стороны, европейские исследователи, начиная с 50-х годов прошлого века [1, 2], указывают на преимущества машин с параллельной кинематикой по сравнению с традиционными станочными схемами. К ним относятся высокая динамичность, улучшенные массогабаритные характеристики при сравнимых показателях по жесткости, высокая мобильность рабочей платформы, особенно ценная при реализации многокоординатных станков [3, 4]. С другой стороны, несмотря на более чем полувековую историю, подобные машины так и не получили значимого распространения и

признания в промышленности. Среди причин помимо присущего станкостроению консерватизма и факторов субъективного характера следует особенно выделить требование высокой универсальности оборудования. Именно эта причина оказывает все возрастающее влияние на процесс обновления парка станков, что вызвано переходом экономики от *типового массового* производства к *массовой кастомизации* ("mass customization"). Массовая кастомизация предусматривает производство товаров и услуг в целях удовлетворения *индивидуальных* нужд потребителей, причем показатели его эффективности должны быть сравнимы с массовым производством [8].

Современные станки обязаны обеспечивать минимальное машинное время и высокую динамичность при обработке разнообразных типов деталей, в том числе крупногабаритных заготовок. Однако машины с параллельной кинематикой не позволяют успешно решать такие технологические задачи, в первую очередь, из-за малого объема рабочей зоны. Вместе с тем, традиционные кинематические схемы станков, конструктивно пригодные для обработки крупногабаритных деталей, не способны обеспечивать высокую динамичность из-за неизбежно увеличивающейся при этом массы станка.

В известной работе [9] было впервые введено понятие дуальности механизмов с последовательными и параллельными кинематическими цепями. Следует выделить также работу [10], где была отмечена редко упоминаемая дуальность между относительными рабочими объемами и структурными свойствами (кинематической жесткостью, массогабаритными характеристиками) этих схем при условии равной механической мобильности. Указано, что механизмы с последовательной кинематикой имеют наибольший рабочий объем при более плохих структурных свойствах, а параллельные — наоборот.

С учетом изложенного логичным представляется создание оптимальной топологии механизма, которая бы сочетала в себе достоинства обоих типов кинематических цепей, — создание гибридной последовательно-параллельной структуры. При таком кинематическом построении машины ее последовательная часть, ответственная за обеспечение большого объема рабочей зоны, несет на себе параллельную компоненту, которая обеспечивает высокую динамичность и мобильность станочной системы [11, 12]. Как доказано в работе [13], при таком подходе эффективная масса/инерционность

гибридного механизма, воспринимаемая в центре инструмента в любом заданном направлении, оказывается не больше, чем у отдельно взятой параллельной структуры. Поэтому более массивный гибридный станок будет обеспечивать динамические качества, которые не ниже, а нередко и выше, чем даже у более легкой параллельной подсистемы.

Однако подобные гибридные системы представляют собой сложные механизмы с точки зрения анализа динамики и управления. Они обладают не только избыточным числом степеней подвижности для выполнения технологической задачи, но и часто статически неопределимы.

Моделированию динамики данного класса станков и посвящена данная статья.

### Фрезерный центр "Дупарод" как пример станка с гибридной кинематической структурой

Центр Дупарод (рис. 1, см. третью полосу обложки), разработанный Фраунhoferским институтом станков и обработки давлением (Кемниц, Германия), является пятикоординатным фрезерным многоцелевым центром, предназначенным для обработки больших размеров деталей в автомобильной промышленности. К числу основных видов деталей, в первую очередь, можно отнести матрицы, пуансоны и корпуса двигателей [11]. Несмотря на то, что масса только подвижных органов станка превышает 40 т, а максимальные перемещения по координатам X/Y/Z достигают 6000/4000/1700 мм, центр способен обеспечивать скорости подач по X/Y до 7000 мм/мин, ускорения — до 4 м/с<sup>2</sup>, точности позиционирования — до 20 мкм. Подобных характеристик удалось достичь за счет использования уникальной гибридной кинематической схемы и ряда инновационных решений в системе управления станком.

Последовательная подсистема состоит из пары жестко скрепленных между собой параллельных подвижных порталов, поступательно перемещающихся по рельсам. Они несут на себе параллельную подсистему, имеющую вид кинематической структуры типа ножницы (рис. 2, см. третью сторону обложки).

В центральном узле ножниц находится вертикально перемещающаяся платформа, несущая высокоскоростную головку шпинделя. Отличительной чертой этой подсистемы является то, что одно из четырех звеньев, перемещающих шпиндельную платформу, является сдвоенным (см. схему на рис. 1 в правом верхнем углу). Такая схема была выбрана в результате сравнения возможных конструкций механизма

на основе методов конечных элементов, с учетом оценки статической жесткости механизма в горизонтальной плоскости и жесткости на скручивание вокруг оси шпинделя [11].

Все кинематические элементы в системе, кроме шпинделя, приводятся в движение непосредственно линейными синхронными двигателями на постоянных магнитах, отличающимися высокой динамичностью и отсутствием люфта. Управление станком построено на основе высокопроизводительной системы ЧПУ, связанной с линейными приводами по оптоволоконной шине SERCOS, обеспечивающей частоту дискретизации внешнего контура управления в 4 кГц.

### Особенности управления последовательно-параллельными машинами типа Дупарод

Структура типа Дупарод позволяет ярко проиллюстрировать те сложности, которые возникают при управлении подобными гибридными станками.

Рассмотрим задачу управления станком как задачу позиционирования оси шпинделя по двум операционным координатам в горизонтальной плоскости. Степенью кинематической избыточности называется разница между числом степеней подвижности механизма и числом управляемых операционных координат. Как следует из рис. 3, 4, механизм обладает кинематической избыточностью (число степеней подвижности равно 3). Таким образом, центр Дупарод имеет *кинематическую избыточность первой степени*.

Такой тип избыточности хорошо известен для последовательных кинематических схем, в частности для манипуляторов. Его главное свойство заключается в том, что обратная задача кинематики имеет бесконечное множество решений. Это позволяет ставить и решать различные оптимизационные задачи: определения максимальных скоростей движения, поиска траекторий для обхода препятствий, исключения особых конфигураций сочленений и т. п. [13].

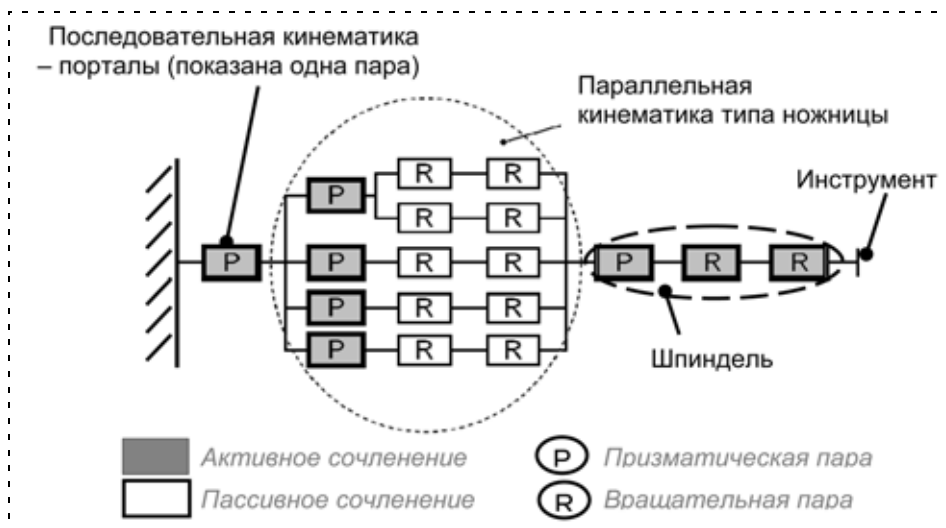


Рис. 3. Кинематическая схема Дупарод

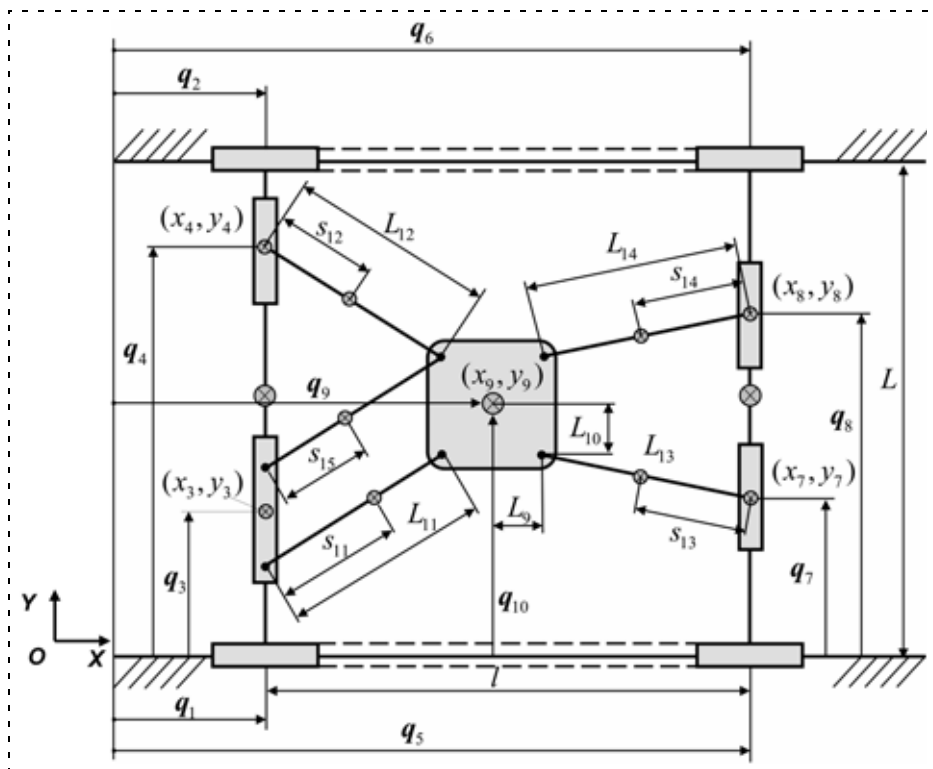


Рис. 4. Упрощенная схема Дупарод в горизонтальной плоскости с введенной системой координат ( $q_i$ ), расположением центров масс ( $S_i$ ) и длинами звеньев ( $L_i$ )

В свою очередь, параллельные механизмы нередко создают с приводной избыточностью, когда число активных (т. е. приводящихся в движение отдельными приводами) сочленений превышает число степеней подвижности механизма. Разница этих величин называется степенью приводной избыточности. На основании рис. 3 можно заключить, что Дупарод обладает *приводной избыточностью второй степени*, так как имеет пять активных сочленений для позиционирования оси шпинделя, если жестко скрепленные порталы рассматривать как одну несущую платформу. Механизмы с такой избыточностью более сложны для анализа из-за статической неопределенности, поскольку операционные силы в центре инструмента соответствуют бесконечному множеству комбинаций усилий, развиваемых приводами. Вместе с тем, это же свойство может быть использовано при оптимизации распределения сил между активными сочленениями, например, для увеличения кинематической жесткости, ухода от особых (сингулярных) точек траектории и т. д. [7, 10, 12].

Как следует из вышеизложенного, явление избыточности хорошо демонстрирует уже упоминавшуюся дуальность механизмов с последовательной и параллельной схемами. Поэтому задачи управления и планирования траектории для механизмов такого класса, как Дупарод, требуют решения одновременно двух оптимизационных задач, вызванных наличием в этих машинах двух типов избыточности.

Дополнительно следует учитывать, что моментные электроприводы ("direct-drive"), построенные

на базе линейных двигателей, передают внешние силовые возмущения непосредственно на приводную систему без редуцирования. В этом состоит характерное отличие высокомоментных приводов от традиционных конструктивных модулей с использованием механических передач. Внешние воздействия могут быть обусловлены как технологическим процессом обработки детали, так и динамическим взаимодействием звеньев механизма. Поэтому во многих случаях для подобных машин типовые алгоритмы управления (например, стандартный ПИД-регулятор исполнительного уровня) показывают низкое качество работы. Требуется использование более совершенных методов управления, которые строятся с учетом динамики механизма (например, на основе методов вычисляющих

моментов, нелинейного управления по обратной связи и т. д.). Для реализации методов этого класса необходимо получить и провести анализ динамических уравнений гибридных машин.

### Метод моделирования динамики гибридного механизма

Существует множество специализированных пакетов программ для моделирования динамики сложных механических систем, таких как SimMechanics, Modelica, MBDyn и т. д. Однако существует ряд проблем, которые делают их использование для моделирования и последующей реализации алгоритма управления гибридным станком не всегда возможным.

Во-первых, сложность кинематической структуры таких станков, как Дупарод, нередко оказывается слишком высокой для универсальных пакетов. Например, широко известный пакет SimMechanics не способен работать с механизмами с приводной избыточностью [14].

Во-вторых, существует требование гарантированной сходимости решения уравнений динамики за жестко определенный промежуток времени (как правило, не превышающий нескольких миллисекунд). Это требование вызвано тем, что в конечном счете алгоритм управления должен быть встроен в программную систему жесткого реального времени, управляющую станком. Однако большинство пакетов для моделирования используют алгоритмы, такие как метод координатного проецирования, которые высокопроизводительны, но не обя-

зательно гарантированно детерминированы по времени вычислений.

В-третьих, вычислительная цена интерфейса между некоторыми пакетами для вычисления динамики и Simulink/MatLab, где чаще всего реализуется моделирование системы управления станком, высока. Например, необходимая частота дискретизации вычислений траектории в 200 Гц означает 200 переключений в секунду между двумя программными средами.

В-четвертых, необходимость встраивания алгоритма в реальную систему управления означает необходимость получения уравнений в форме, подходящей для программирования их численного решения, а не в виде "черного" ящика, полученного от среды моделирования динамики механизма.

В то же время, вывод динамических уравнений вручную не оправдан из-за большого числа переменных, описывающих поведение системы. К тому же сложности возникают и при интегрировании уравнений. Так, динамика последовательно-параллельных механизмов описывается дифференциально-алгебраическими уравнениями (ДАУ) индекса 3. Однако пакет MatLab способен численно решать только системы ДАУ индекса 1.

Для разрешения такой ситуации был предложен метод автоматизированного вывода уравнений динамики и их последующего решения на основе метода компьютерной алгебры, подробно описанного в [15]. Суть его заключается в том, что инженеру-исследователю вручную необходимо только задать тип звеньев (вращательное, поступательное, вращательно-поступательное) и описать ограничения, накладываемые на звенья, используя символные операторы в среде Mathematica. В режиме off-line автоматически осуществляются вывод уравнений динамики, их преобразование к линейным матричным уравнениям со встроенной компенсацией погрешности вычислений, и вызывается MatLab, где уже в режиме on-line выполняется решение уравнений на основе методов линейной алгебры. Данный подход позволяет, например, решать обратную задачу динамики для Дупарод гарантированно в пределах нескольких миллисекунд при современной вычислительной мощности персонального компьютера.

### **Математический формализм вывода уравнений динамики**

На рис. 4 показана система введенных присоединенных координат  $\{q_i\}$  для описания гибридного механизма Дупарод. Положение порталов описывается координатами  $(q_1, q_2)$  и  $(q_5, q_6)$ , параллельная подсистема — координатами  $(q_3, q_4, q_7, q_8, q_9, q_{10})$ .

Несмотря на то, что число введенных переменных превышает минимальное число координат, достаточных для полного описания динамики идеального механизма с  $r = 3$  степенями подвижности, такой выбор является оправданным. В этом

случае координаты  $(q_1, q_2, \dots, q_8)$  соответствуют активным сочленениям, управляемым приводами, а координаты  $(q_9, q_{10})$  непосредственно определяют положение оси шпинделя, т. е. являются целевыми переменными для задачи управления станком.

Выбор же минимальной системы координат недостаточен с точки зрения задачи управления. Например, скрепленные между собой порталы приводят к движению линейными двигателями, расположенными в звеньях, описываемых координатами  $q_1, q_2, q_5, q_6$ . Эти двигатели должны обеспечивать идентичные и строго синхронизированные между собой перемещения соответствующих звеньев для избегания перекосов и заклинивания порталов. Однако в общем случае нагрузка на соответствующие двигатели не одинакова и зависит от положения параллельного механизма относительно порталов. Этот эффект необходимо учитывать при реализации алгоритма управления соответствующими четырьмя приводами. Введение же только одной переменной, которая бы описывала положение всей порталной платформы, не позволит решить эту задачу.

Так как размерность введенной системы координат  $\{q_i\}$  равна  $n = 10$ , то необходимо дополнительно наложить  $k = n - r = 7$  голономных связей, чтобы скомпенсировать введенные избыточные семь координат.

Для вывода уравнений динамики системы с наложенными связями был выбран формализм Лагранжа—Эйлера. Для задач прямой динамики он приведет к системе  $(k + n)$  линейных матричных уравнений относительно  $n$  неизвестных координат и  $k$  множителей Лагранжа. Система решается известными методами линейной алгебры. Другие методы, будучи более эффективными, не гарантируют сходимости решения в жестко заданном интервале времени.

Метод разложения координат [16] основан на зависимости координат между собой, возникающей из-за наличия наложенных связей. Поэтому вектор координат может быть определенным образом разложен на зависимые и независимые переменные. Этот подход требует меньшего количества вычислений, но может приводить к сингулярным матрицам в решении [17]. В таком случае потребуются выбор нового набора независимых координат и нового решения системы уравнений.

Алгоритм расширенного формализма Лагранжа [18] приводит к системе  $n$  уравнений, робастен в окрестностях особых точек, но решение находится итеративно до достижения требуемой сходимости, что опять же не является вычислительным процессом, детерминированным по времени.

Кратко опишем процесс вывода уравнений динамики на основе выбранного метода (более подробное изложение дано в работе [15]).

Благодаря удобно введенной системе координат, кинетические энергии всех тел 1, ..., 9 и 11, ..., 15,

находящихся в плоском движении, легко рассчитываются по общей зависимости:

$$T_i = \frac{m_i v_i^2 + J_i \omega_i^2}{2}, \quad (1)$$

где  $v_i$  и  $\omega_i$  — абсолютные линейная и угловая скорости, которые вычисляются как производные по времени от положения центра масс и угловой ориентации звена  $i$ ;  $m_i$  — его масса;  $J_i$  — момент инерции относительно оси  $Z$ , проходящей через центр масс звена, выраженный в локальной системе координат.

Для системы в горизонтальной плоскости вектор Лагранжа—Эйлера  $\xi$  выражается через общую кинетическую энергию  $K = \sum_{i=1}^n T_i = f(q_i(t), \dot{q}_i(t))$  как:

$$\xi = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial K}{\partial q} = M\ddot{q} + b, \quad (2)$$

где  $M(q)$  — матрица инерции;  $b(q, \dot{q})$  — вектор центробежных и Кориолисовых сил механизма.

Уравнения наложенных на систему связей, предполагаемых голономными, склерономными и идеальными, должны отражать два физических факта: 1) шпиндельная платформа жестко привязана звеньями 11, ..., 15 к звеньям 3, 4, 7, 8;

2) оба портала жестко соединены между собой и передвигаются параллельно вдоль рельсов. Первый тип связей легко получить из геометрических соображений. Например, как следует из рис. 5, для звеньев 4, 12 и платформы справедливо равенство

$$AB^2 + AC^2 - BC^2 = 0$$

или следующее выражение связи  $G_1$ :

$$G_1: \frac{1}{2} ((x_9 - x_3 - L_9)^2 + (y_9 - y_3)^2 - L_{11}^2). \quad (3)$$

Коэффициент 1/2 введен для упрощения последующих выкладок. По аналогии получим выражения для других связей этого типа  $G_2, G_3, G_4$ . Второй

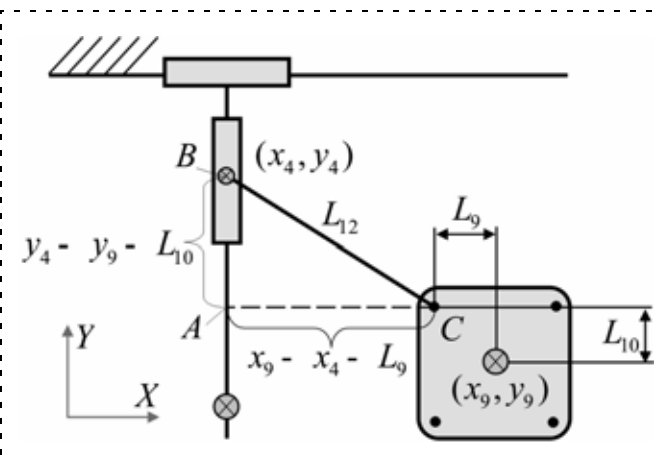


Рис. 5. Геометрическая интерпретация связей

тип связей получается из очевидных соотношений, выражающих целостность порталной платформы:

$$G_5: q_2 - q_1; G_6: q_6 - q_5; G_7: q_5 - q_1 - l. \quad (4)$$

Отсюда имеем  $(k \times 1)$ -мерную алгебраическую систему уравнений связей:

$$G = 0. \quad (5)$$

Вектор силы реакции связей размерности  $(n \times 1)$  определяется как  $R = J_G^T \lambda$  через  $(k \times 1)$ -мерный вектор множителей Лагранжа  $\lambda$  и  $(k \times n)$ -мерную матрицу Якоби  $J_G$ :

$$J_G = \frac{\partial G}{\partial q}. \quad (6)$$

Итоговая система ДАУ, состоящая из  $n$  дифференциальных уравнений второго порядка и  $k$  алгебраических соотношений, полностью описывает динамику механизма с наложенными связями в общем виде:

$$\begin{cases} \xi + R - F = 0; \\ G = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где  $F$  —  $(n \times 1)$ -мерный вектор обобщенных сил, состоящий из усилий приводов, развиваемых в активных сочленениях 1, ..., 8, и проекций результирующих операционных сил, приведенных к оси шпинделя, на оси  $OX$  и  $OY$ .

### Моделирование динамики гибридного механизма со стабилизацией траектории

Для моделирования движения механизма Dynapod требуется решить прямую задачу динамики, т. е. для заданного вектора сил  $F = (F_1, F_2, \dots, F_n)^T$  определить вектор из  $(n + k) = 17$  неизвестных  $(q^T, \lambda^T)^T = (q_1, \dots, q_n, \lambda_1, \dots, \lambda_k)^T$ . Заметим, что определение множителей Лагранжа является полезным побочным эффектом, так как позволяет определить силы реакций и рассчитать силы трения в парах.

Главная проблема состоит в том, что полученная система ДАУ (7) имеет индекс дифференцирования, равный 3. Этот индекс есть наименьшее число аналитических дифференцирований, требующихся для того, чтобы из системы ДАУ можно было бы получить систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) в форме Коши [19]. К сожалению, не существует стандартных алгоритмов, гарантированно решающих подобные уравнения. Так, в пакете MatLab имеются решатели только для систем ДАУ индекса 1.

Один из подходов заключается в двойном интегрировании уравнений позиционных связей (5) и последующем приведении уравнений (7) к системе ОДУ, эквивалентной оригинальной системе ДАУ на уровне ускорений. Однако полученное решение на длинных траекториях будет терять устойчивость. Это известный феномен в теории ДАУ [19], вызванный тем, что последующее двойное интегрирование полученного решения, которое необходимо выпол-

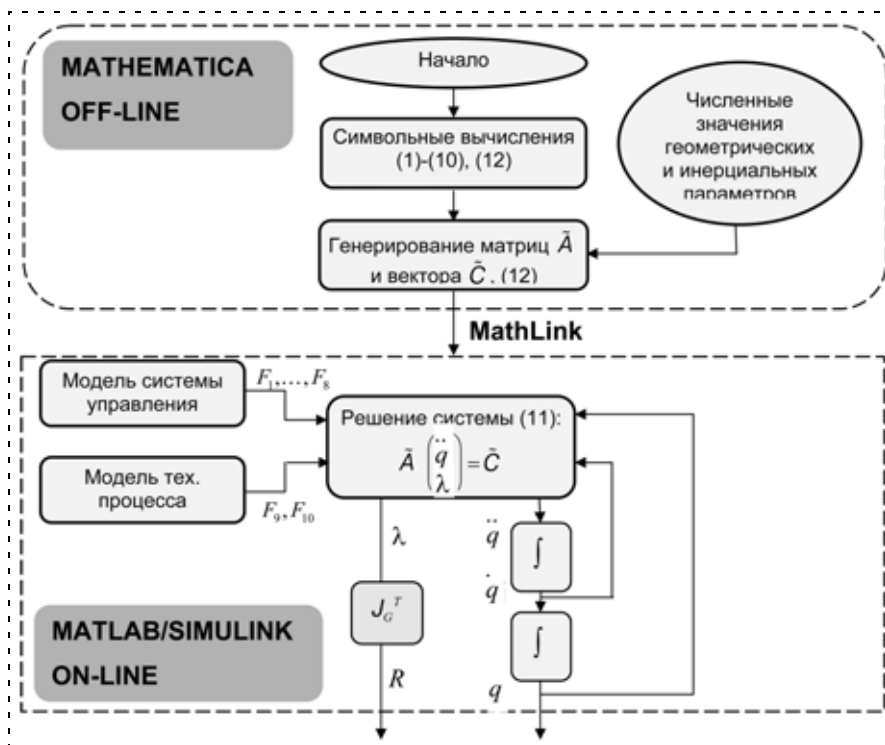


Рис. 6. Схема автоматизированного решения прямой задачи динамики

нить, чтобы вернуться от ускорений к положениям, ведет к нарушению связей на уровне положений и в результате — к неустойчивости траектории.

Для устранения подобного эффекта введем автоматическую компенсацию погрешностей вычисления по методу, предложенному в [20]. Для этого заменим систему связей на уровне положений (5) на новую систему, удовлетворяющую наложенным связям на уровне положений, скоростей и ускорений:

$$\ddot{G} + 2\alpha \dot{G} + \beta^2 G = 0, \quad (8)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — подстраиваемые коэффициенты стабилизации. Их равенство, например, будет гарантировать асимптотическую стабилизацию решения. Соответственно, систему ДАУ (7) заменим на эквивалентную систему ОДУ (9):

$$\begin{pmatrix} \xi + R - F \\ G + 2\alpha G + \beta^2 G \end{pmatrix} = 0. \quad (9)$$

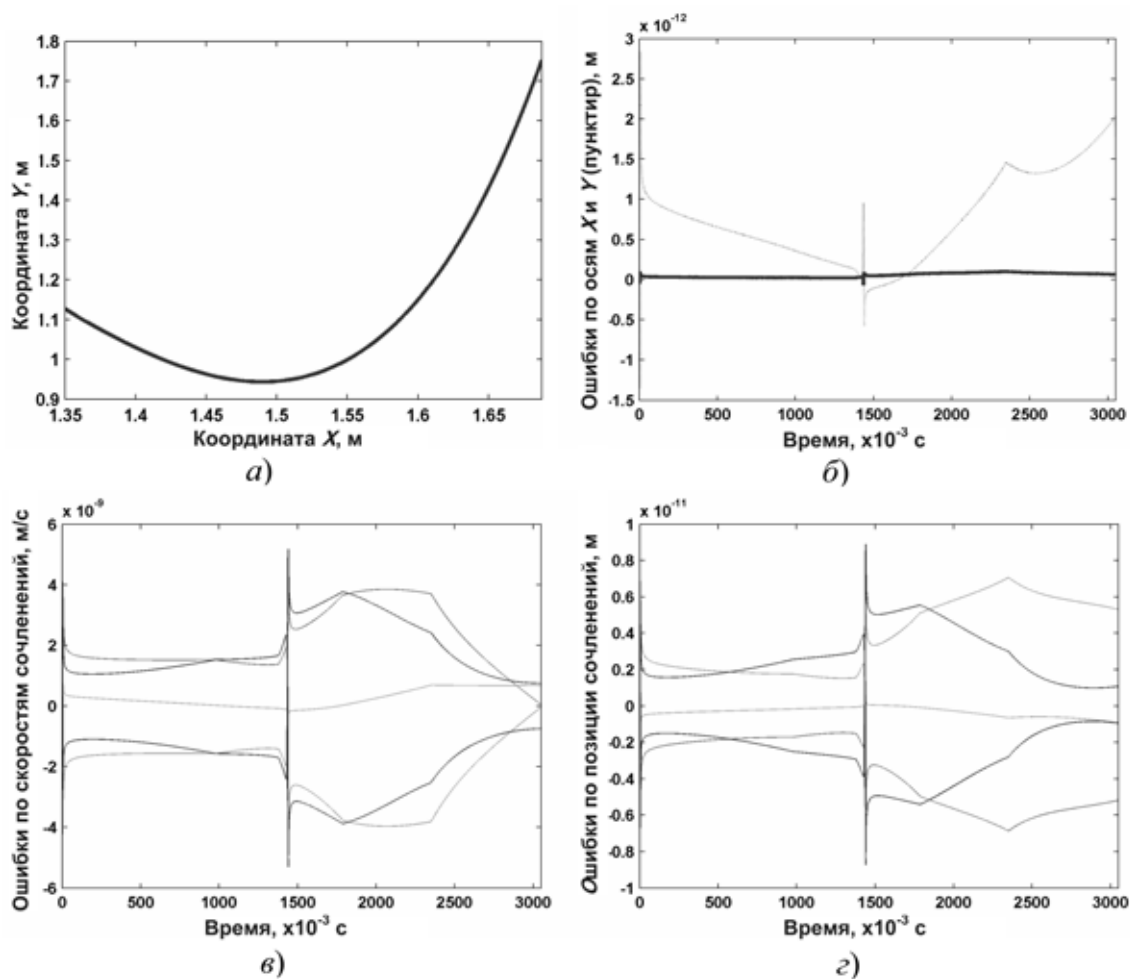


Рис. 7. Результаты сравнения с пакетом SimMechanics



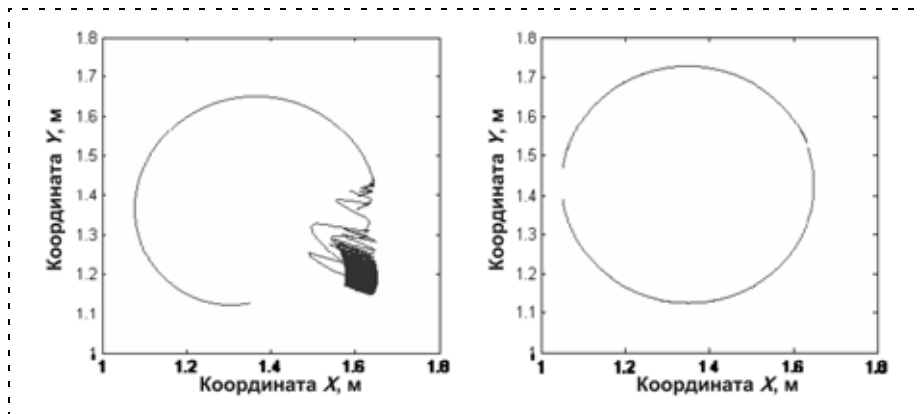


Рис. 8. Результаты стабилизации траектории

Принимая во внимание (5) и (6), получаем

$$\dot{G} = J_G \dot{q}; \quad \ddot{G} = J_G \ddot{q} + \dot{J}_G \dot{q}.$$

Тогда (8) может быть преобразовано к виду

$$J_G \ddot{q} = -(\dot{J}_G + 2\alpha J_G) \dot{q} - \beta^2 G. \quad (10)$$

С учетом (2), (6), (10) систему (9) можно представить в эквивалентном виде:

$$\tilde{A} \begin{pmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{pmatrix} = \tilde{C}, \quad (11)$$

где матрицы  $\tilde{A}$  и  $\tilde{C}$  ( $\dim \tilde{A} = (n+k) \times (n+k)$  и  $\dim \tilde{C} = (n+k) \times (n+k)$ ) выражаются следующим образом:

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} M & J_G^T \\ J_G & 0 \end{pmatrix}; \quad \tilde{C} = \begin{pmatrix} F - B \\ -(J_G + 2\alpha J_G) \dot{q} - \beta^2 G \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Уравнение (11) легко решается эффективными методами линейной алгебры, таким как метод исключений Гаусса, относительно ускорений  $q$  и множителей Лагранжа  $\lambda$ , которые полностью удовлетворяют наложенным связям. При этом цикл решения уравнения (11) будет детерминирован по времени. Общая схема автоматизированных вычислений представлена на рис. 6.

### Верификация результатов моделирования

Описанный подход был сверен по результатам работы со специализированным коммерческим пакетом SimMechanics.

Для того чтобы обойти ограничение этого пакета на моделирование систем с приводной избыточностью [14], в схеме станка Дупарод, построенной в SimMechanics, на часть активных сочленений подавались нулевые задания по усилиям таким образом, что механизм терял приводную избыточность. Идентичные тестовые условия были применены и к предложенной в статье модели динамики. На рис. 7 представлены тестовая траектория центра инструмента (рис. 7, а), разница между сравниваемыми методами по рассчитанным значени-

ям: положения центра инструмента в направлении  $OX$  и  $OY$  (рис. 7, б), присоединенным скоростям (рис. 7, в) и присоединенным координатам (рис. 7, г).

Как видно, разница в расчетах по позиции между представленным методом и SimMechanics находится на уровне в  $10^{-11} \dots 10^{-12}$  м, близкой к вычислительной ошибке округления, что указывает на высокую точность полученных результатов. При этом метод, описанный в статье, в отличие от SimMechanics, не имеет ограничений на моделирование

систем с приводной избыточностью и детерминирован по времени вычислений.

На рис. 8 представлена траектория центра инструмента, полученная без стабилизации (слева) и со стабилизацией (справа) решения прямой задачи динамики. Время вычисления одной точки на ПК Pentium-M 1.5 ГГц с 512 Мбайт памяти составляет не более 2,8 мс.

### Заключение

В статье рассмотрены предпосылки для возникновения новых конструкций станков, отвечающих современным требованиям экономики. Уникальность предложенных гибридных последовательно-параллельных кинематических схем, рассмотренных на примере фрезерного центра Дупарод, состоит в наличии в них как кинематической, так и приводной избыточностей. Это, с одной стороны, предоставляет пространство для оптимизации кинематических и динамических характеристик механизмов станков, а с другой — создает сложности для их моделирования.

### Список литературы

1. Gough V. E. Contribution to discussion of papers on research in automotive stability, control and tire performance // Proc. Auto Div. Inst. Mechanical Engineers. 1956—1957.
2. Stewart D. A platform with 6 degrees of freedom // Proc. of the Inst. Of Mech. Engineers. 1965. 180. Part. 1, 15. P. 371—386.
3. Каган В. Г. 50, 40, 30, 20, 10 лет спустя. Изд. 2. М.: РАСХН, 2003.
4. Бушуев В. В. Практика конструирования машин. М.: Машиностроение, 2006. 448 с.
5. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение. М.: Машиностроение, 2006. 256 с.
6. Hunt K. H. Structural kinematics of in-parallel-actuated robot arms // ASME, J. Mech., Transmission, Automat Design. 1983. V. 105. P. 705—712.
7. Merlet J. P. Force feedback control of parallel manipulators // Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat. (Philadelphia, PA). 1988. P. 1484—1489.
8. Tseng M. M., Jiao J. Mass customization // Handbook of Industrial Engineering, Technology and Operation Management (3rd ed.). NY: Wiley. P. 685, 2001.
9. Waldron K. J., Hunt K. H. Series-parallel dualities in actively coordinated mechanisms // Int. J. Robotics Res. 1991. V. 10. N 5. P. 473—480.

10. Kurtz R., Hayward V. Multiple-goal kinematic optimization of a parallel spherical mechanism with actuator redundancy // IEEE Transactions Robotics and Automation. 1992. V. 8. N 5. P. 644–651.

11. Neugebauer R., Drossel W.-G., Ihlenfeldt S., Harzbecker Ch. Design method for machine tools with bionic inspired kinematics // CIRP Annals, Manufacturing Technology. 2009. N 58. P. 371–374.

12. Kim J., Park F. C., Ryu S. J., Kim J., Hwang J. C., Park C., Iurascu C. C. Design and analysis of a redundantly actuated parallel mechanism for rapid machining // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2001. V. 17 (4). P. 423–434.

13. Khatib O. Inertial properties in robotic manipulation: an object-level framework // Int. J. Robotic Res. 1995. V. 14 (1). P. 19–36.

14. <http://www.mathworks.com/support/solutions/en/data/1-1BZLX/index.html?product=MS&solution=1-1BZLX>

15. Poduraev J., Ihlenfeldt S., Loginov A. Development of a Control Approach for PKMs with Scissor Kinematics // The 5th Chem-

nitz Parallel Kinematics Seminar. Reports from the IWU 33, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Zwickau. 2006. P. 175–192.

16. Wehage R. A., Haug E. J. Generalized coordinate partitioning of dimension reduction in analysis of constrained dynamic systems // ASME, Journal of Mechanical Design 104. 1982. P. 247–255.

17. Garcia de Jalon J., Bayo E. Kinematic and dynamic simulation of multibody systems: the real-time challenge. New York: Springer-Verlag, 1994.

18. Bayo E., Ledesma R. Augmented Lagrangian and mass-orthogonal projection methods for constrained multibody dynamics // Nonlinear Dynamics. 1996. N 9.

19. Хайпер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. М.: Мир, 1999.

20. Baumgarte J. Stabilization of constraints and integrals of motion in dynamical systems // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 1. 1972. P. 1–16.

УДК 621.007.52

**В. А. Клевалин**, д-р техн. наук, проф.,  
**А. Ю. Поливанов**, канд. техн. наук, доц.,  
 Московский государственный технологический университет "СТАНКИН",  
 shpoliv@mail.ru

## Системы технического зрения в промышленной робототехнике

*Рассмотрены особенности функционирования систем технического зрения (СТЗ) в промышленной робототехнике. Определены требования, предъявляемые к СТЗ по точности, быстрдействию, достоверности распознавания и надежности исходя из требований технологических операций, таких как сборка, обслуживание металлорежущих станков и др. Показано, что при бинарной СТЗ целесообразно применение построчной аппаратной обработки информации, что увеличивает быстродействие СТЗ в 3,5 раза по сравнению с растровым кодированием. Приведена методика проектирования СТЗ, а также методы повышения точности позиционного управления многозвенными манипуляторами с помощью систем технического зрения.*  
**Ключевые слова:** промышленный робот, точность, надежность, управление, информация, идентификация

### Общие сведения

Использование промышленных роботов (ПР) в различных технологических операциях позволяет повысить гибкость и производительность производственных систем, освободить человека от тяжелых и монотонных операций. Области применения ПР по видам производства (технологии) на примере западных стран показаны на рис. 1. От общего числа ПР 27,4 % применяются в области манипулирования изделиями при обслуживании технологического оборудования и около 70 % используются в области манипулирования инструментом при сварке, сборке, нанесении покрытий, удаления облоя и др.

В ближайшем будущем предполагается рост применения ПР в различных производствах со-

гласно диаграмме, изображенной на рис. 2, из которой следует, что самый высокий прирост предполагается в области сборки (67 %) и в области сварки (68 %). Если учесть, однако, абсолютное значение применяемых ПР, то всего 8,6 % приходится на важную для производства область сборки, на которую расходуется свыше 40 % заработной платы, т. е. в этой области применение промышленных роботов находится только в начале. Причину этого следует искать в отсутствии интеграции мультисенсоров с соответствующими интеллектуальными датчиками.

Однако среди многообразия технологических операций далеко не все можно автоматизировать с



Рис. 1. Применение ПР по видам производства



Рис. 2. Рост применения ПР по видам производства

помощью ПР с жестким программным управлением (ПР первого поколения). Многие операции, такие как сборка, сварка, зачистка, выборка деталей из накопителя и др., требуют от ПР способности подстраиваться к изменяющимся внешним условиям, анализировать окружающую среду, планировать траекторию движения, т. е. требуют очувствления ПР.

К числу наиболее эффективных средств очувствления ПР наряду с другими относятся системы технического зрения (СТЗ), основными преимуществами которых являются высокая информативность, дальное действие, возможность быстрой и простой переналадки для работы с различными объектами, широкий круг решаемых задач.

СТЗ следует рассматривать не только как средство очувствления ПР, но и как средство очувствления робото-технического комплекса (РТК) в целом, так как наряду с задачами, относящимися к управлению ПР (определение положения объектов, их ориентации, мест захватывания и т. д.), СТЗ может решать и обычно решает задачи, обеспечивающие правильное функционирование остального оборудования РТК (входной контроль заготовок, измерительный контроль, контроль правильности выполнения операций и др.). Очувствление РТК с помощью СТЗ является в настоящее время одним из перспективных направлений автоматизации производства.

В последнее время уделяется серьезное внимание созданию СТЗ в США, Японии, Германии, Великобритании, Швейцарии, Франции, Италии и др.

Так, ежегодно рост применения СТЗ в США, Западной Европе и Японии составляет 24...28 %. Более 50 % СТЗ в промышленности применяется в США. Отмечается также тенденция снижения средней стоимости СТЗ вследствие совершенствования технологии производства ее компонентов.

Серьезное внимание созданию и внедрению СТЗ уделяется и в нашей стране. Наибольших успехов в разработке СТЗ добились коллективы разработчиков в МИРЭА, ИПМ им. М. В. Келдыша, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ЦНИИ РТК, МГТУ "СТАНКИН" и других, в том числе и коммерческих, организациях.

При проектировании ПР и РТК с СТЗ имеют место две противоречивые тенденции. С одной стороны — создание недорогих специализированных систем, пригодных для эффективного решения одной или нескольких близких задач и непригодных для решения других задач; с другой стороны — разработка мощных универсальных СТЗ, которые могут быть использованы в технологических операциях со множеством задач, однако при этом они обладают существенной аппаратной избыточностью и их применение в реальном производстве не может быть эффективным. При этом, как правило, СТЗ проектировалась на основе серийно выпускаемого оборудования.

В условиях автоматизированного машиностроительного производства к СТЗ предъявляются такие требования, как малогабаритность, высокое быстродействие и низкая стоимость, высокая эффективность и простота в обращении, повышенная надежность за счет упрощения структуры и развитые функциональные возможности.

В промышленной робототехнике, как правило, используют достаточно простые СТЗ. В зависимости от задачи обработки информации и типа ПР наиболее распространены 2D- и 2,5D-СТЗ. В первых применяются видеодатчики, формирующие плоскую сцену, во-вторых при сканировании плоской сцены выделяется трехмерная информация.

Препятствием широкому распространению систем технического зрения является проблема реального времени. Данная проблема заключается в том, что большой объем информации обрабатывается современными компьютерами в течение времени, которое часто соизмеримо, а иногда и превышает время выполнения технологической операции. При этом применение СТЗ сдерживает развитие основного технологического оборудования, снижая производительность автоматизированного комплекса.

В настоящее время наиболее распространенной является однопроцессорная структура СТЗ, построенная на базе персонального компьютера (рис. 3). Более 80 % эксплуатируемых СТЗ относятся к однопроцессорным. В ряде случаев в блоке предварительной обработки реализованы растровый и построчный способы кодирования информации. При растровом способе предварительная обработ-

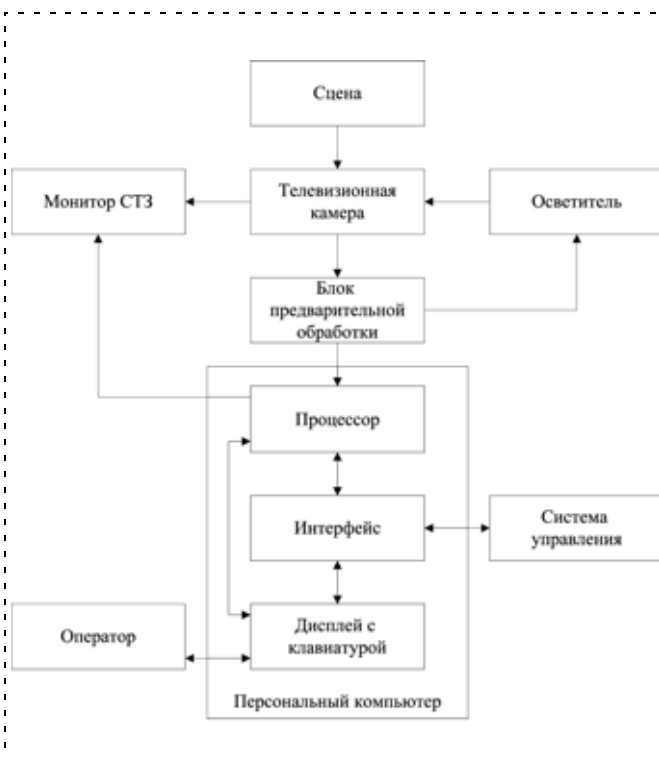


Рис. 3. Структура СТЗ ПР на базе персонального компьютера

ка осуществляется широкоизвестными цифровыми линейными и нелинейными операторами. Построчное кодирование информации заключается в аппаратном определении строчных координат фронтов объектов на бинаризованном изображении. При этом выделяются координаты передних фронтов  $a_j$ , соответствующих переходу фон—объект при светлом объекте на темном фоне, и координаты задних фронтов  $b_j$ , соответствующих переходу объект—фон на изображении. Для получения вертикальных координат в начале каждой строки выполняется запись кода начала строки  $l_k$ ,  $k = 1, \dots, n_c$  ( $n_c$  — число строк на изображении). Строчный код изображения получается в виде последовательности  $(a_j, b_j, l_k)$ . При этом длина кода изображения, а следовательно, требуемый объем запоминающего устройства, и время обработки изображения зависят от числа координат на изображении. Построчное кодирование дает по сравнению с растровым экономию в требуемом объеме запоминающего устройства в 2,5...5 раз и увеличение скорости обработки изображения в 1,5...2 раза.

### **Концепция построения систем технического зрения с учетом технологических требований и характеристик РТК**

Системы технического зрения (СТЗ) являются достаточно мощными средствами информационного обеспечения промышленных роботов (ПР) и в настоящее время могут успешно использоваться совместно с ПР в различных технологических операциях. Обеспечение эффективности использования СТЗ ПР требует учета особенностей технологической задачи на стадии разработки системы.

В качестве основных технологических операций, в которых могут быть использованы СТЗ ПР, следует отметить такие, как обслуживание оборудования по загрузке-выгрузке, сборка, контроль, сварка и др.

Назначение робота, условия его работы, требования к точности выполнения операций и другие технологические факторы оказывают существенное влияние на структуру СТЗ и ее характеристики, что обусловлено следующими причинами:

1. Признаки и характеристики, определяемые на основе обработки изображения и используемые для распознавания объектов и анализа ситуаций, зависят от выполняемой технологической задачи и, следовательно, являются технологически обусловленными.

2. Требования по быстродействию, предъявляемые к СТЗ ПР, зависят от временных характеристик основного оборудования, в состав которого входит СТЗ ПР.

3. Требования по достоверности распознавания объектов с помощью СТЗ определяются последствиями, к которым приводят ошибки в распознава-

нии, зависящие, в свою очередь, от логики функционирования РТК и объектов манипулирования.

4. Степень сложности обрабатываемого изображения определяет совокупность методов и средств его обработки, зависящих от анализируемой сцены, формы объектов, структуры и состояния их поверхностей, что также определяется видом и конкретными особенностями технологической операции.

Отсюда следует, что при разработке СТЗ ПР факторы технологического процесса, в котором предполагается использовать СТЗ, являются определяющими, поэтому их необходимо формализовать и учитывать на начальной стадии проектирования СТЗ ПР. Кроме того, необходимо учитывать весь комплекс технологических связей и зависимостей и выполнять научное обоснование эксплуатационных характеристик по точности, быстродействию, достоверности распознавания и надежности на основе системного подхода, в соответствии с которым при разработке структуры ее технических средств учитывать технологические требования РТК (технологическая задача, состав оборудования, объекты манипулирования, структура РТК и т. п.) (рис. 4).

Рассмотрим задачи, решаемые СТЗ ПР, а также требования и накладываемые ограничения на примере различных технологических операций.

### **Сборочные операции**

Операцию сборки нужно рассматривать как частную операцию, понимая под ней собственно сопряжение компонентов деталей (или сборочных единиц), или как обобщенную операцию, состоящую из целого ряда приемов, таких как:

- 1) захватывание собираемого компонента из накопителя;
- 2) ориентирование компонента;
- 3) перенос компонента в рабочую зону;
- 4) относительное ориентирование сопрягаемых поверхностей собираемых компонентов;
- 5) сопряжение компонента;
- 6) закрепление компонентов в требуемом положении;
- 7) контроль сопряжения.

Таким образом, обобщенная операция сборки включает в себя целый ряд приемов (1, 2, 4, 5, 7), при выполнении которых возможно использование СТЗ ПР. Использование СТЗ ПР при выполнении приемов 1, 2, 7 характерно не только для сборочных, но и для других операций (обслуживание оборудования, контроль и т. д.).

Требования по быстродействию для СТЗ ПР, обслуживающей сборочные операции, определяются требуемой скоростью выполнения сборки  $T_{сб \max}$ :

$$T_{сб} \leq T_{сб \max},$$

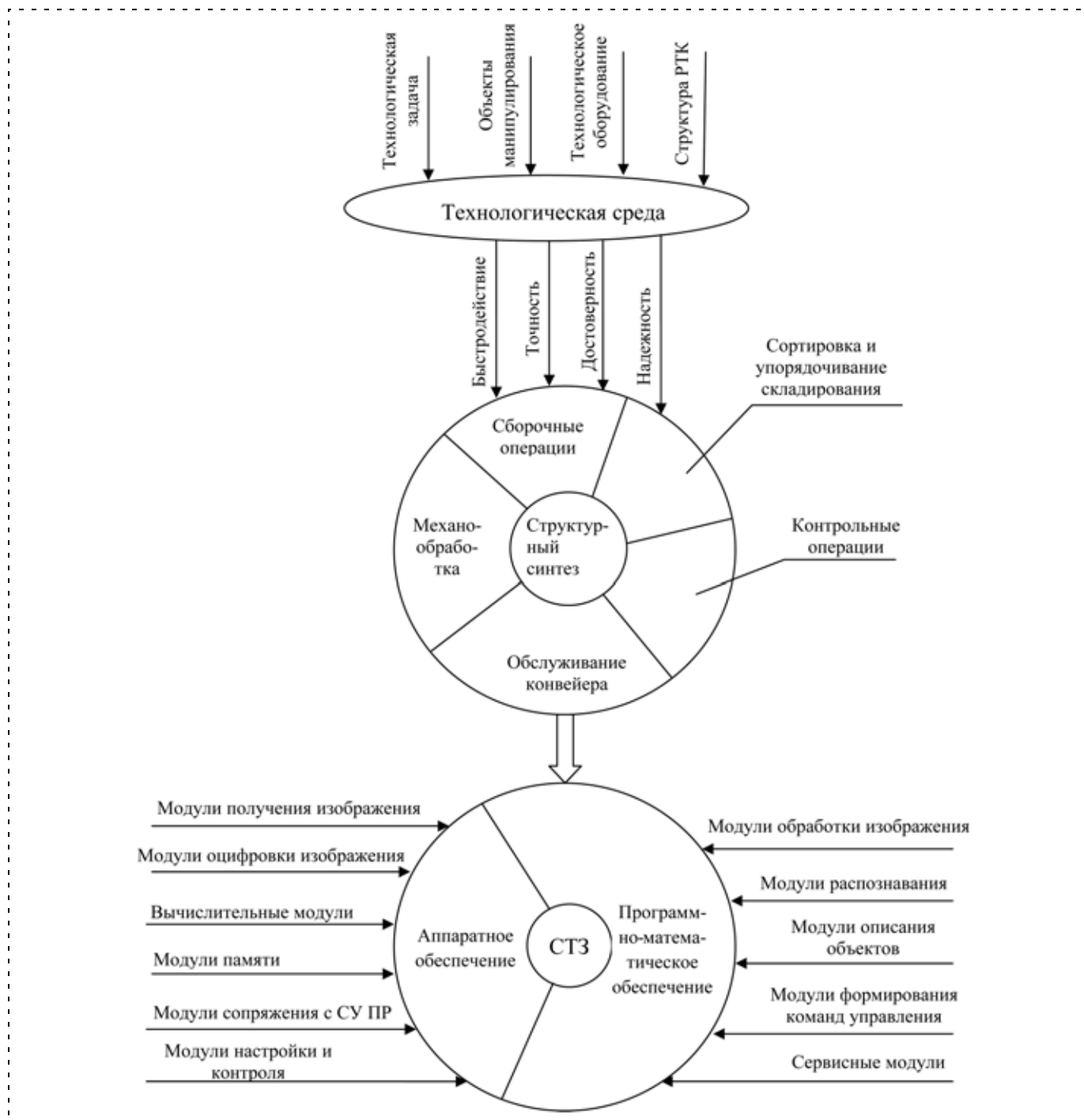


Рис. 4. Этапы проектирования СТЗ ПР

где  $T_{сб} = \sum_{k=1}^n T_{сб k}$  — общее время сборки;  $T_{сб k}$  — время сборки  $k$ -й детали;  $n$  — число деталей в сборочной единице;

$$T_{сб k} = T_{вз k} + \sum_{i=1}^{n_c} (T_{тр i} + T_{СТЗ i}),$$

где  $T_{вз k}$  — время взятия  $k$ -й детали из накопителя (с использованием или без использования СТЗ ПР);  $n_c$  — число съемов изображения с помощью

СТЗ ПР;  $T_{тр i}$  — время транспортирования детали с помощью ПР после  $i$ -го съема изображения;  $T_{СТЗ i}$  — время функционирования СТЗ ПР при  $i$ -м съеме изображения.

Приняв времена функционирования  $T_{СТЗ i}$  приблизительно равными, можно получить:

$$T_{СТЗ} \leq \frac{T_{сб \max} - (T_{вз} + T_{тр})n}{n_c n},$$

где  $T_{тр}$  — время транспортировки детали с помощью ПР из накопителя на сборочную станцию.

## Обслуживание металлорежущих станков

При использовании СТЗ для управления ПР, обслуживающим основное технологическое оборудование, например, при операции загрузки-выгрузки металлообрабатывающего станка, задачей СТЗ ПР является управление взятием заготовки из накопителя. При этом определяются положение и ориентация заготовок для управления схватом, осуществляются их распознавание для обеспечения правильного выбора, а также предупредительный входной контроль. Выбор параметров описания объектов зависит от сложности обрабатываемого изображения, которая определяется типом заготовки, типом накопителя и условиями освещения.

Время цикла  $T_{\text{ц}}$  РТК механообработки складывается из двух составляющих:

$$T_{\text{ц}} = T_{\text{о.с}} + T_{\text{з.в}},$$

где  $T_{\text{о.с}}$  — время обработки детали на станке (машинное время);  $T_{\text{з.в}}$  — время загрузки заготовки и выгрузки обработанной детали с помощью ПР.

Укладка обработанной детали и взятие новой заготовки (время  $T_{\text{у.в}}$ ) осуществляется параллельно с обработкой на станке. Чтобы не было простоя оборудования, должно выполняться соотношение

$$T_{\text{у.в}} < T_{\text{о.с}}.$$

Допустим, что СТЗ ПР применяется для управления схватом ПР при взятии заготовок из накопителя, тогда время  $T_{\text{у.в}}$  определяется как

$$T_{\text{у.в}} = T_{\text{тр.д}} + T_{\text{у.д}} + T_{\text{тр.д-з}} + T_{\text{СТЗ}} + T_{\text{вз.з}} + T_{\text{тр.з-ож}},$$

где  $T_{\text{тр.д}}$  — время транспортирования детали;  $T_{\text{у.д}}$  — время укладки детали;  $T_{\text{тр.д-з}}$  — время перемещения схвата ПР к накопителю заготовок;  $T_{\text{СТЗ}}$  — время функционирования СТЗ;  $T_{\text{вз.з}}$  — время взятия заготовки;  $T_{\text{тр.з-ож}}$  — время перемещения схвата ПР с заготовкой на позицию ожидания.

Таким образом, должно выполняться соотношение

$$T_{\text{СТЗ}} \leq T_{\text{о.п}},$$

где  $T_{\text{о.п}} = T_{\text{о.с}} - T_{\text{тр.д}} - T_{\text{у.д}} - T_{\text{тр.д-з}} - T_{\text{вз.з}} - T_{\text{тр.з-ож}}$  — время, при котором не происходит простой оборудования РТК из-за СТЗ.

### Измерительный и опознавательный контроль

Операции контроля, выполняемые с помощью СТЗ ПР, обычно не связаны с управлением движением ПР (за исключением случаев, когда телекамера СТЗ установлена на руке ПР и с помощью движения ПР проводится осмотр объектов с раз-

личных ракурсов), поэтому для СТЗ ПР является вспомогательным при выполнении других операций. При измерительном контроле проводится выделение заданных точек на изображении и определение расстояний между ними. Для контроля дефектов контролируруемыми параметрами являются размеры дефектов  $D_i$  и их расположение на поверхности объектов  $(x, y)$ .

Очень существенным для построения СТЗ ПР являются требования по достоверности распознавания объектов. Характеристикой достоверности распознавания является вероятность безошибочного распознавания объектов:

$$P_{\text{б.р}} = 1 - \sum_{i=1}^{n_k} \left( P_{A_i} \sum_{j=1, j \neq i}^{n_k} P_{ji} \right),$$

где  $P_{A_i}$  — априорная вероятность появления  $i$ -го класса;  $P_{ji}$  — вероятность ошибочного отнесения объекта  $i$ -го класса к  $j$ -му классу;  $n_k$  — число классов объектов.

### Методика проектирования и модульный принцип построения систем технического зрения

Требования к точности СТЗ основываются на соответствующих требованиях для ПР, работающего в составе РТК. В зависимости от технологической операции требования к точности определяются следующими факторами:

- требуемой точностью наведения ПР или слежения;
- требуемой точностью наведения схвата ПР для обеспечения условий захватывания;
- допустимой погрешностью определения размеров и расстояний.

Текущее значение погрешности исходя из технологических требований будет равно

$$\Delta_{\text{техн}} = \Delta_{\text{пр}} + \Delta_{\text{СТЗ}}$$

или

$$\Delta_{\text{СТЗ}} = \Delta_{\text{техн}} - \Delta_{\text{пр}}.$$

Тогда допустимую относительную погрешность определения линейных величин СТЗ можно определить по формуле

$$\delta_{\text{с}} = \frac{\Delta_{\text{СТЗ}}}{D_F},$$

где составляющие поля зрения  $D_F$  по осям  $X$  и  $Y$  зависят от расстояния от объекта до телевизионной камеры:

$$D_{FX} = \frac{K_X}{\chi_p} m_H d; \quad D_{FY} = \frac{K_Y}{\chi_p} m_V d,$$

где  $m_H, m_V$  — число элементов разложения по горизонтали и вертикали соответственно;  $\chi_p$  — масштабный коэффициент системы координат ПР;  $d$  — расстояние от объекта до телевизионной камеры;  $K_X, K_Y$  — масштабные коэффициенты по осям  $X$  и  $Y$ .

Наиболее важными задачами, решаемыми при построении СТЗ ПР и РТК, являются:

- выбор приемника изображения;
- выбор аппаратуры обработки изображения;
- выбор алгоритмов обработки изображения;
- выбор методов описания и распознавания объектов.

При этом модульный принцип, заключающийся в разработке аппаратных и программных модулей, позволяет получить необходимые характеристики СТЗ при выполнении заданной технологической задачи при исключении избыточности, что, в свою очередь, ведет к снижению стоимости.

Получение ряда характеристик телекамер, например таких, как высокое разрешение, малые геометрические искажения и массогабаритные параметры, удастся реализовать на основе фоточувствительных микросхем с зарядовой связью (ФМЗС). Эти микросхемы также часто называют приборами с зарядовой связью (ПЗС). Современные телекамеры на их основе имеют большое разрешение —  $512 \times 512$  пикселей и более. Примером может служить промышленная СТЗ Ranger, серийно выпускаемая фирмой SICK/IVP с разрешением  $512 \times 512$  пикселей. Конструктивно аппаратная часть этой системы выполнена в корпусе телекамеры, а ее настройка и программирование осуществляется с помощью персонального компьютера, подключаемого по интерфейсу Ethernet. За счет применения быстродействующего сигнального процессора скорость обработки данных достигает до 35 000 профилей в секунду. Эта система относится к классу систем 2,5D, поскольку позволяет строить трехмерное изображение объекта с использованием одной камеры, лазерной подсветки и движения объекта относительно камеры.

Входными данными для процедуры проектирования СТЗ ПР по предлагаемой методике на основе технологических требований РТК являются рассмотренные выше требования по быстродействию, точности и достоверности распознавания. Рассмотрим данную проектную процедуру в виде последовательности действий (вычислений и решений), которые необходимо проводить при построении СТЗ ПР по комплексной методике под заданную технологическую задачу.

На первом этапе необходимо выбрать приемник изображения, при использовании которого удовлетворяются требования точности. Для этого необходимо подобрать приемник изображения с числом элементов разложения

$$\begin{cases} m_V \geq m_{F_{\min}}; \\ m_H \geq m_{F_{\min}}, \end{cases}$$

где  $m_H$ ,  $m_V$  — число элементов разложения по горизонтали и вертикали соответственно;  $m_{F_{\min}}$  —

минимальное число элементов разложения, которое рассчитывают по формуле

$$m_{F_{\min}} = \frac{\sqrt{2}}{\delta_e},$$

где  $\delta_e$  — относительная погрешность определения линейных размеров, получаемая на основе технологических условий.

Кроме этого, для приемника изображения необходимо выполнить условие:

$$\delta_e \geq \delta_{\text{иск. п}},$$

где  $\delta_{\text{иск. п}}$  — коэффициент геометрических искажений приемника изображения.

На выполнение данного условия особенно необходимо обращать внимание при использовании в качестве приемника изображения видеоконтов, для которых величина  $\delta_{\text{иск. п}}$  относительно велика и составляет 1...3 %.

Одним из наиболее важных при построении СТЗ ПР является вопрос о выборе бинарного или многоградационного подхода к построению, который должен быть решен на основе оценки возможности выделения объектов на изображении пороговым сравнением. Для этого может быть сформирован критерий, использующий перечисленные выше показатели сложности обработки изображения.

Растровый или построчный способы кодирования изображения могут быть выбраны на основе использования критерия, учитывающего требуемый объем запоминающего устройства и время обработки изображения.

Разработаны алгоритмы обработки информации в СТЗ с построчным кодированием изображения, которые позволяют построить систему, способную разделять объекты любой топологии на изображении, распознавать их на основе заданного словаря признаков, определять параметры положения и ориентации объектов и их фрагментов.

Важнейшими входными данными для построения СТЗ являются особенности и характеристики изображения, которое необходимо обрабатывать. В изображении содержится большой объем информации (при разложении  $256 \times 256 \times 8$  он составляет 256 Кбайт), поэтому учитывать при проектировании все особенности изображения невозможно, да и нет смысла. Таким образом, возникает задача разработки системы показателей, которые характеризовали бы основные особенности изображения объектов, с точки зрения их обработки в СТЗ.

В качестве таких показателей принимаются следующие:

1. Показатель контраста  $\Pi_K$ , характеризующий степень различия по яркости объектов и фона:

$$\Pi_K = \frac{g_{o \min}}{g_{\text{ф. max}}},$$

где  $g_{o \min}$  — минимальная яркость объекта;  $g_{\phi \max}$  — максимальная яркость фона.

2. Показатель неравномерности объекта  $\Pi_{н. о.}$ , характеризующий неравномерность яркости объектов на изображении:

$$\Pi_{н. о.} = \frac{2(g_{o \max} - g_{o \min})}{g_{o \max} + g_{o \min}},$$

где  $g_{o \max}$  — максимальная яркость объекта на изображении.

3. Показатель неравномерности фона  $\Pi_{н. ф.}$ , характеризующий неравномерность яркости фона изображения:

$$\Pi_{н. ф.} = \frac{2(g_{\phi \max} - g_{\phi \min})}{g_{\phi \max} + g_{\phi \min}},$$

где  $g_{\phi \min}$  — минимальная яркость фона.

4. Показатель шума, характеризующий амплитуду шума по яркости на изображении.

При проектировании СТЗ требуется решать следующие задачи:

- выбор типа системы — бинарный или многоградационный;
- выбор способа кодирования изображения для бинарной системы (матричный или строчный);
- выбор алгоритмов обработки изображений для выбранного типа системы;
- уточнение выбора приемника изображений;
- выбор метода составления описаний объектов на изображении и алгоритмов определения параметров описаний;
- выбор методов распознавания объектов по их описаниям, решающих правил и алгоритмов реализации процесса распознавания;
- выбор аппаратной реализации (автономная или в составе системы управления ПР).

Вопрос о выборе бинарной или многоградационной системы должен быть решен на основе оценки возможности выделения объектов пороговым сравнением, так как при наличии такой возможности предпочтение нужно отдавать бинарной системе как более простой и экономичной в отношении используемой аппаратуры и используемых алгоритмов обработки информации. Исходя из этих соображений запишем условие выбора бинарной системы:

$$g_{o \min} - g_{\phi \min} \geq \Pi_{ш} + K_3 g_{o \min}$$

или

$$1 - \frac{1}{\Pi_k} \geq \frac{\Pi_{ш}}{g_{o \min}} + K_3,$$

где  $K_3$  — коэффициент запаса, а член  $K_3 g_{o \min}$  обеспечивает необходимый диапазон изменения значений порогового уровня при бинаризации (из практических соображений для надежности разделения

объектов и фона требуется обеспечить  $K_3 \geq 0,1$ );  $\Pi_{ш}$  — показатель шума.

Разрешив неравенство относительно  $\Pi_k$ , получим

$$\Pi_k \geq \frac{1}{1 - \left( \frac{\Pi_{ш}}{g_{o \min}} - K_3 \right)}.$$

В случае выбора бинарного подхода к построению СТЗ требуется определить растровый или построчный способ кодирования изображения, от которого зависит объем ОЗУ и, по существу, аппаратная сложность устройства.

При растровом способе кодирования объем памяти составляет

$$V_{зур} = m_V m_H,$$

где  $m_V$  и  $m_H$  — число элементов разложения по вертикали и горизонтали соответственно.

Для построчного кодирования изображения объем памяти составляет

$$V_{зуп} = n_{\phi} (\log_2 m_H + 1),$$

где  $n_{\phi}$  — число фронтов.

Рассмотрим время обработки изображения для каждого из способов кодирования на примере такой операции, как подсчет площади всех объектов на изображении. Для растрового способа кодирования время обработки составляет

$$t_{обр} = 2m_V m_H t,$$

где  $t$  — длительность одной машинной операции. Время обработки для аналогичной операции при построчном способе кодирования изображения составляет

$$t_{обр} = (n_{\phi} + m_V)t.$$

Преимущество того или иного способа определяется соотношениями

$$\vartheta_V = \frac{V_{зуп}}{V_{зур}} = \frac{n_{\phi} (\log_2 m_H + 1)}{m_V m_H};$$

$$\vartheta_t = \frac{V_{обр}}{V_{обр}} = \frac{n_{\phi} + m_V}{2m_V m_H}.$$

Комплексный показатель:

$$\vartheta = \vartheta_V \vartheta_t = \frac{(m_V + n_{\phi})(\log_2 m_H + 1)n_{\phi}}{2m_V^2 m_H^2}.$$

Алгоритм построения СТЗ ПР, учитывающий технологические требования, состоит в следующем:

1. Определить допустимые значения:
  - а) относительной погрешности определения линейных величин СТЗ  $\delta_e$ ;
  - б) времени функционирования СТЗ  $T$  (быстродействие);
  - в) вероятности безошибочного распознавания  $P_{б.р.}$



2. Предварительно выбрать приемник изображения исходя из требований точности и условий освещенности.

3. Определить показатели сложности обработки изображения  $P_k, P_{н. о}, P_{н. ф}, P_{ш}$ .

4. Определить выполнение условия относительно  $P_k$ . Если оно выполняется, то можно выбрать бинарную систему, если нет — то многоградационную.

5. При выборе бинарной системы определить комплексный показатель  $\nu$ ; если  $\nu < 1$ , то выбрать построчный метод кодирования, если  $\nu > 1$ , то растровое кодирование.

6. Выбрать алгоритм обработки изображения.

7. Выбрать блоки и модули аппаратной реализации.

### Практическое применение методики проектирования СТЗ

Практическое применение комплексной методики проектирования СТЗ ПР можно продемонстрировать на примере созданного полупромышленного образца СТЗ для ПР "Электроника НЦТМ-01", предназначенного для работы в составе РТК механообработки. Типичной операцией для этого РТК может быть чистовая обработка торцов детали типа дисков.

ПР в составе рассматриваемого РТК механообработки предназначен для обслуживания металло-режущих станков с ЧПУ, таких, например, как МС-032, СТП-220 и др. Функцией ПР в данном случае является установка на станок заготовок и снятие обработанных деталей. Заготовку и деталь захватывают два поворотных схвата ПР, расположенных под углом  $90^\circ$  по отношению друг к другу, поэтому взятие обработанной детали и установка новой заготовки в шпиндель станка происходят за один цикл работы ПР.

СТЗ ПР в рассматриваемом варианте применения ПР должна выполнять следующие функции: входной опознавательный контроль заготовок (заготовки типов, отличающихся от заданных, не устанавливаются на станок и не обрабатываются), оценка заполненности накопителя, управление схватом ПР.

Для успешного функционирования СТЗ ПР должна удовлетворять технологическим требованиям, рассмотренным ранее. Для обоснования требований, предъявляемых к СТЗ по быстродействию, проанализируем цикл работы РТК, включающий станок с ЧПУ и ПР "Электроника НЦТМ-01".

Цикл работы состоит из следующих основных операций:

- обработка заготовок на станке;
- снятие обработанной детали и установка новой заготовки;
- установка детали в накопитель;
- распознавание и определение положения очередной заготовки с помощью СТЗ ПР;

- взятие новой заготовки из накопителя;
- возврат в исходное положение.

Первая из перечисленных операций относится к работе станка с ЧПУ. Время, затрачиваемое на обработку деталей, равно

$$T_{о.с} = T_{п} + T_{обр},$$

где  $T_{п}$  — время подвода и отвода инструмента;  $T_{обр}$  — время обработки:

$$T_{обр} = \frac{d_{об}}{sn},$$

где  $d_{об}$  — диаметр обрабатываемого объекта (заготовки),  $s$  — подача,  $n$  — число оборотов шпинделя. Подставляя заданные в данном случае исходные технологические условия  $d_{об} = 40$  мм,  $s = 0,10$  мм/об,  $n = 700$  об/мин, получаем  $T_{о.с} = 37,3$  с. Для определения длительности операций, связанных с функционированием ПР, определим элементарные перемещения ПР, входящие в операцию и их длительности.

Длительности операций, связанных с перемещением ПР, следующие:

Время снятия детали и установки заготовки,	14,7
$T_{с.у}, с$ .....	
Время установки детали в накопитель, $T_{у.д}, с$ . . . .	15,6
Время взятия заготовки из накопителя, $T_{в.з}, с$ . . . .	10,6
Время возврата в исходное положение, $T_{в.и}, с$ . . . .	9,0

Операции установки детали в накопитель, взятие заготовки из накопителя, возврат в исходное положение и функционирование СТЗ происходят параллельно с обработкой заготовки на станке.

Поэтому выражение для времени функционирования СТЗ, обеспечивающего отсутствие простоя РТК, в данном случае принимает вид

$$T_{о.п} < T_{о.с} - (T_{у.д} + T_{вс} + T_{в.и}),$$

где  $T_{вс}$  — время вспомогательной операции.

Для рассматриваемого случая получаем:

$$T_{о.п} < 37,3 - 35,2 = 2,1 \text{ с.}$$

Таким образом, требование, предъявляемое к СТЗ ПР по быстродействию в данном случае:  $T_{СТЗ} < 2,1$  с.

Приемник изображения (телекамера) должен быть выбран на основании требований по точности, которые в данном случае определяются из условий обеспечения захватывания. Для ПР "Электроника НЦТМ-01" захватывание детали возможно, когда смещение схвата относительно центра детали не превышает  $\Delta = 15$  мм. При размерах накопителя  $400 \times 400$  мм и поля зрения  $D_f = 500$  мм требование по точности составляет:  $\delta \gg \frac{15}{500} = 0,03$  или 3 %.

Требование по числу элементов разложения составляет:  $m_{штН} = 47$ . Значит в качестве приемника

может быть выбрана телекамера с геометрическими искажениями  $\delta \ll 3\%$ . Возможно использование информации одного полукадра, т. е.  $m_V = 288$ .

Для получения приблизительно одинакового масштаба по вертикали и горизонтали следует принять число элементов разложения по строке  $m_V = 266$ . Значения яркостей для участков объектов и фона составляют  $g_{o \min} = 24$ ,  $g_{o \max} = 27$ ,  $g_{\phi \min} = 12$ ,  $g_{\phi \max} = 19$  при амплитуде шума, равной 1.

На основании этого можно определить показатели сложности изображения:

$$P_k = \frac{g_{o \min}}{g_{\phi \max}} = 1,26;$$

$$P_{н. о} = \frac{2(g_{o \max} - g_{o \min})}{g_{o \max} + g_{o \min}} = 0,12;$$

$$P_{н. \phi} = \frac{2(g_{\phi \max} - g_{\phi \min})}{g_{\phi \max} + g_{\phi \min}} = 0,45.$$

Легко видеть, что для решения поставленной задачи целесообразно использовать бинарный подход к построению СТЗ.

Для выбора способа кодирования изображения определим значения параметров  $\vartheta_v$  и  $\vartheta_t$ , учитывающих аппаратную сложность и быстродействие системы:

$$\vartheta_v = \frac{n_{\phi}(\log_2 m_H + 1)}{m_V m_H} = \frac{3732(\log_2 256 + 1)}{288 \cdot 256} = 0,46;$$

$$\vartheta_t = \frac{n_{\phi} + m_H}{2m_V m_H} = \frac{3732 + 256}{2 \cdot 288 \cdot 256} = 0,03.$$

Значение  $n$  (число фронтов на изображении) в данном случае определяется по формуле

$$n = \frac{2P_{об} d_{об}}{D_V} = \frac{2 \cdot 81 \cdot 40 \cdot 288}{500} = 3732,$$

где  $P_{об}$  — максимальное число объектов в поле зрения ( $P_{об} = 9 \cdot 9 = 81$ );  $d_{об}$  — средний диаметр объекта ( $d = 40$  мм);  $D_V$  — величина поля зрения ( $D_V = 500$  мм).

Полученные значения критериев  $\vartheta_v < 1$  и  $\vartheta_t < 1$ , следовательно, целесообразно использовать построчное кодирование изображения.

Требуемый объем памяти определяется длиной кода:

$$S = n + m_V = 3732 + 288 = 4020 \text{ слов.}$$

Число ячеек запоминающего устройства:  $S = 4096 = 4K$ .

## Идентификация значений геометрических параметров и повышение точности ПР

Помимо основных задач по распознаванию деталей и определению их координат СТЗ ПР работа может решать некоторые дополнительные задачи, нацеленные на повышение качества работы ПР и РТК в целом. К таким задачам относится идентификация значений параметров робота в целях повышения точности его работы за счет исключения систематической погрешности робота. В качестве параметров, подлежащих идентификации, можно эффективно использовать длины звеньев манипулятора. При этом время технологической операции не увеличивается, так как идентификация проводится во время простоя ПР несколько раз за рабочую смену. В результате будут учтены температурные отклонения длин звеньев, люфты и износ манипулятора. Вычисленные значения длин звеньев используют для корректировки кинематической модели робота. Предлагается следующая последовательность действий по идентификации значений параметров ПР:

- 1) сбор данных о реальном положении манипулятора в его рабочей области;
- 2) статистическая обработка накопленных результатов;
- 3) выбор кинематической модели манипулятора;
- 4) идентификация геометрических параметров манипулятора исходя из его кинематической модели;
- 5) апробация результатов с использованием аналитического программирования.

Сбор данных о реальном положении манипулятора является самой сложной задачей. Она решается двумя способами. Первый основывается на контактных методах, которые плохо поддаются автоматизации и требуют много времени, но обладают достаточной точностью и достоверностью. Второй использует бесконтактные методы, более быстрые и легко автоматизируемые. К таким методам относится определение реального положения манипулятора с помощью СТЗ. При этом важной задачей является выбор способа размещения камер над рабочей поверхностью робота: неподвижно над рабочей областью, на концевом звене манипулятора и комбинированный.

В результате исследования проблемы определения положения манипулятора с помощью СТЗ оказалось, что хорошо подходит схема размещения камер на концевом звене робота из-за меньшей вероятности попадания манипулятора в поле зрения камер.

В процессе определения положения манипулятора рекомендуется выводить робот в одну и ту же позицию измерения несколько раз, а затем проводить статистическую обработку результатов для минимизации случайной погрешности.

Следующий этап — выбор кинематической модели манипулятора. При этом желательно, чтобы она соответствовала номинальной модели манипу-

лятора, используемой в устройстве управления робота. Кинематические модели роботов можно разделить на три вида: первый — составленный на основе аппроксимирующих функций — полиномов различного вида. Параметры этих функций не несут в себе физического смысла. Второй вид включает модели, составленные на основе преобразований координат по правилу Денавита—Хартенберга. Такие модели удобны тем, что содержат минимум необходимых параметров и поэтому применяются для большинства роботов в качестве номинальных. Третий вид моделей применяется там, где недостаточна точность преобразований координат Денавита—Хартенберга. Примером может служить модель робота, полученная на основе преобразований систем координат с шестью параметрами. Такая модель часто используется при моделировании задач робототехники и применяется для многозвенных манипуляторов со сложной конструкцией звеньев.

Для определения значений геометрических параметров необходимо записать функцию радиус-вектора робота от вектора обобщенных координат в аналитическом виде, используя выбранную модель:

$$r = f(q, l),$$

где  $q$  — вектор обобщенных координат, выступает в роли известной величины;  $l = (l_1, \dots, l_m)$  — вектор геометрических параметров — искомые величины.

Так как имеется большое количество данных о положении робота, то для составления системы уравнений для нахождения значений геометрических параметров следует применять метод наименьших квадратов:

$$S = \sqrt{\sum_{k=1}^N (p_{xk} - x_k)^2 + \sum_{k=1}^N (p_{yk} - y_k)^2 + \sum_{k=1}^N (p_{zk} - z_k)^2} \rightarrow \min\{S\},$$

где  $k$  — номер экспериментальной точки;  $N$  — число точек измерения;  $x_k, y_k, z_k$  — измеренные положения робота;  $p_{xk}, p_{yk}, p_{zk}$  — вычисляемые положения робота.

Система уравнений для нахождения геометрических параметров запишется в виде

$$\frac{\partial S}{\partial l_1} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial l_2} = 0; \quad \dots \quad \frac{\partial S}{\partial l_m} = 0.$$

Большинство адаптивных роботов с СТЗ оборудуются одной камерой. Это связано с тем, что для многих технологических задач важна точность по двум координатам. Для исследования задачи идентификации геометрических параметров был выбран робот РМ-01, оборудованный одной камерой. Схема размещения манипулятора относительно плоскости стола представлена на рис. 5. Здесь к концевому звену манипулятора 1 с помощью специального приспособления крепится камера 2 и лазерный источник 4. Лазерный источник оставляет на плоскости стола 3 метку для визуального наблюдения за положением манипулятора. На столе 3

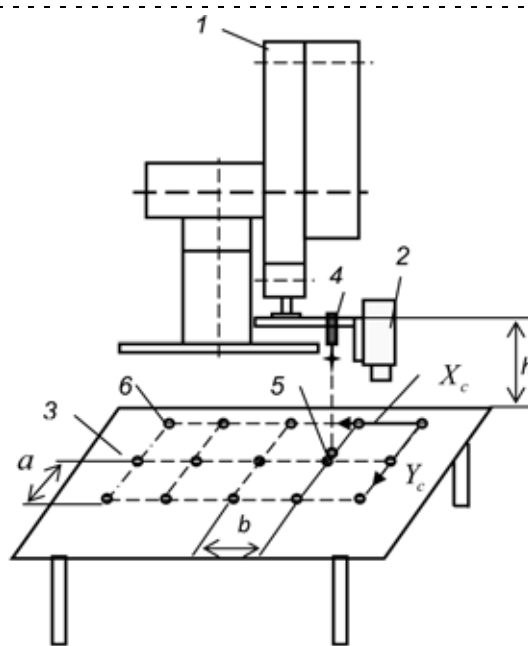


Рис. 5. Схема размещения манипулятора относительно стола для идентификации его геометрических параметров

расположены ориентиры 6 в виде миниатюрных светодиодных излучателей. Число ориентиров — 15. Расстояния между ориентирами  $a = 100$  мм,  $b = 50$  мм. Высота над плоскостью стола  $h = 377$  мм,  $X_c, Y_c$  — система координат стола. Базовая система координат находится у основания манипулятора (на рис. 5 не обозначена).

На плоскости стола установлено 15 ориентиров. Положение робота измерялось в 15, 30 и 45 точках. Были построены три кинематические модели робота: на основе степенных полиномов 1-, 2-, 3- и 4-го порядков, на основе преобразований координат Денавита—Хартенберга, а также кинематическая модель с учетом неточности монтажа манипулятора, которая является расширением предыдущей модели. Эффективными для использования оказались две последние модели.

Для оценки качества идентификации геометрических параметров манипулятора была введена величина  $H$ , которая характеризует квадратическое отклонение результатов, полученных данной кинематической моделью по отношению к действительным значениям:

$$H = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (p_{xk} - x_k)^2 + \sum_{k=1}^N (p_{yk} - y_k)^2}{2N}},$$

где  $p_{xk}, p_{yk}$  — координаты положения робота, полученные аналитически;  $x_k, y_k$  — действительное положение робота;  $N$  — число экспериментальных точек.

Результаты эксперимента по идентификации геометрических параметров робота РМ-01 приведены в таблице.

Параметр	Номинальное значение	N = 15		N = 30		N = 45	
		Без погрешностей установки	С погрешностью установки	Без погрешностей установки	С погрешностью установки	Без погрешностей установки	С погрешностью установки
$a_2$ , мм	431,8	421,46	413,22	357,56	433,34	433,92	432,92
$a_3$ , мм	20,32	74,14	73,88	355,96	20,77	20,08	19,83
$d_4$ , мм	433,07	500,73	501,84	735,54	434,83	465,45	435,62
$l_x$ , мм	—	—	0,12	—	0,0126	—	0,0146
$l_y$ , мм	—	—	0,41	—	0,24	—	0,247
$\varphi$ , °	—	—	0,0814	—	0,10807	—	0,11465
$H'_x$	—	0,98	—	0,69	—	0,69	—
$H_x$	—	1,18	1,11	2,76	0,65	0,79	0,66
$H'_y$	—	5,42	—	1,49	—	1,50	—
$H_y$	—	3,25	3,07	6,21	0,29	1,62	0,30
$H'$	—	3,89	—	1,17	—	1,17	—
$H$	—	2,442	2,308	4,81	0,51	1,27	0,52

Здесь  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $d_4$  обозначены длины звеньев манипулятора;  $l_x$ ,  $l_y$ ,  $\varphi$  — параметры неточности установки оборудования. Первые два параметра характеризуют неточность установки манипулятора по осям, третий — угловое смещение манипулятора,  $H_x$ ,  $H_y$  — квадратические отклонения по осям  $x$  и  $y$  соответственно,  $H$  — общее квадратическое отклонение. Знаком ' обозначены параметры для номинальной модели.

Как видно из таблицы, увеличение точности произошло как минимум в два раза при числе экспериментальных данных  $N = 45$ . Так, для номинальной модели  $H' = 1,17$  мм, а при использовании модели, учитывающей неточность установки оборудования, квадратическое отклонение уменьшилось до  $H = 0,52$  мм. Если рассмотреть результаты по осям, то для номинальной модели  $H'_x = 0,69$  мм,  $H'_y = 1,50$  мм. После идентификации параметров  $H_x = 0,66$  мм,  $H_y = 0,30$  мм. Заметное увеличение точности (в пять раз) произошло по оси  $y$ ; по оси  $x$  — незначительное увеличение точности. Это связано, прежде всего, с геометрическими особенностями манипулятора в данной конфигурации.

Эксперимент показал, что идентификация параметров является эффективным средством повышения точности позиционирования робота. При этом, если использовать кинематическую модель робота, учитывающую неточность монтажа оборудования, можно снизить требования по точности установки робота. При идентификации параметров с СТЗ, оборудованной одной камерой, удается идентифицировать не все параметры (для робота РМ-01 — три из пяти возможных). При этом для идентификации следует выбирать те параметры, которые наиболее сильно влияют на положение схвата робота в рассматриваемой конфигурации.

#### Список литературы

1. **Воротников С. А.** Информационные устройства робототехнических систем: учеб. пособие. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 382 с.
2. **Корендясев А. И., Саламандра Б. Л., Тывес Л. И.** Теоретические основы робототехники. Кн. 2. М.: Наука, 2006. 375 с.
3. **Фу К., Гонсалес Р., Ли К.** Робототехника. М.: Мир, 1989. 620 с.
4. **Юревич Е. И.** Основы робототехники. 2-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 416 с.
5. **Яне Б.** Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2007. 584 с.

*Информация*

### В 2011 г. в Санкт-Петербурге на базе ОАО "Концерн "Электроприбор" состоится:

- ♦ с 30 мая по 1 июня XVIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам;
- ♦ с 1 по 4 марта XIII конференция молодых ученых "Навигация и управление движением (XIII КМУ 2011)"

Подробную информацию о конференции см. на сайте:  
<http://www.elektropribor.spb.ru/rufrset.html>

**С. В. Евстафиева**, преподаватель,  
**В. В. Молодцов**, канд. техн. наук, доц.,  
 МГТУ "СТАНКИН",  
 svetlana.evstafieva@gmail.com

## Моделирование следящего привода подачи современных станков с ЧПУ

*Рассматривается проблема моделирования приводов подачи современных станков на ранних стадиях проектирования. Предложена простая модель динамической системы типового комплектного привода, с удовлетворительной степенью точности воспроизводящая процессы в его электромеханической части. Изучено влияние запаздывания при передаче информации в системе управления на динамические характеристики привода.*

**Ключевые слова:** следящий привод, регулируемый привод, регулятор положения, регулятор скорости, регулятор тока, подчиненное регулирование, обратная связь, ПИ-регулятор, ЛАЧХ, ЛФЧХ, переходный процесс, робастность, информационное запаздывание, линейная модель, вентильный двигатель, двигатель постоянного тока, мехатроника

Развитие машиностроительного производства невозможно без повышения технологических возможностей, гибкости и качества используемого станочного оборудования. Основным направлением решения данного комплекса задач является переход к новым принципам конструирования современных станков.

Традиционно для согласования перемещений в обычных станках использовались кинематические цепи, состоящие из механических звеньев (зубчатые передачи, червячные передачи, ходовые винты, дифференциалы и т. д.). Исполнительные двигатели не являлись частью этих цепей, и их погрешности не оказывали непосредственного влияния на выходную точность детали. Напротив, в кинематических структурах станков с ЧПУ, реализованных на мехатронных принципах, приводы являются важнейшими элементами, обеспечивающими согласование перемещений. Роль цепей из механических звеньев в этих станках выполняют устройство управления и информационная сеть, по которой согласованное задание передается приводам. Подобное решение позволяет исключить влияние погрешностей механических звеньев, но погрешности, возникающие в приводах, и запаздывание при функционировании информационной сети оказывают непосредственное влияние на выходную точность детали.

Характерный для мехатронных систем переход от механических к информационным связям [1] позволил существенным образом повысить гибкость оборудования и спектр реализуемых на станке производящих линий при одновременном повышении точности формообразования. Не вызы-

вает сомнений, что в ближайшее время развитие станкостроения пойдет по пути более широкого использования мехатронных систем. Механические кинематические цепи будут практически полностью заменены совмещенными с исполнительными органами мехатронными устройствами.

Основой следящего привода подачи современных станков с ЧПУ является регулируемый по скорости электропривод, поставляемый в виде комплекта унифицированных модулей, размещаемых на станке и в коммутационном шкафу. Такие приводы имеют широкий диапазон регулирования, высокое быстродействие, позволяют обеспечить необходимое качество переходных процессов. Они являются самостоятельными изделиями, выпускаемыми рядом производителей электротехнической продукции. В России наиболее известными и часто используемыми являются приводы фирм "Siemens", "Fanuc" и "Rexroth Bosch Group".

Для использования в станках с ЧПУ регулируемый привод "настраивают" до следящего, проектируя механическую часть привода подачи и вводя дополнительную цепь обратной связи по положению. Конструкция механической части привода зависит от вида реализуемого перемещения (поступательное или вращение). Она включает в себя перемещаемый узел (рабочий орган) с направляющими и, как правило, тяговое устройство, преобразующее вращение в поступательное перемещение (передача винт—гайка качения, зубчато-реечная передача и т. д.) При недостаточном крутящем моменте двигателя в механической части привода появляется дополнительный редуктор.

Рассмотрим типовую структуру следящего привода подачи, функциональная схема которого представлена на рис. 1. Он построен по принципу подчиненного регулирования и содержит три контура: положения (КП), скорости (КС) и тока (КТ). Устройство управления (контроллер) осуществляет управление всеми контурами следящего привода и организует взаимодействие с контроллером верхнего уровня (устройство ЧПУ станка). Регуляторы положения, скорости и тока являются программными модулями операционной системы контроллера, предназначенными для непосредственного управления соответствующими контурами приво-

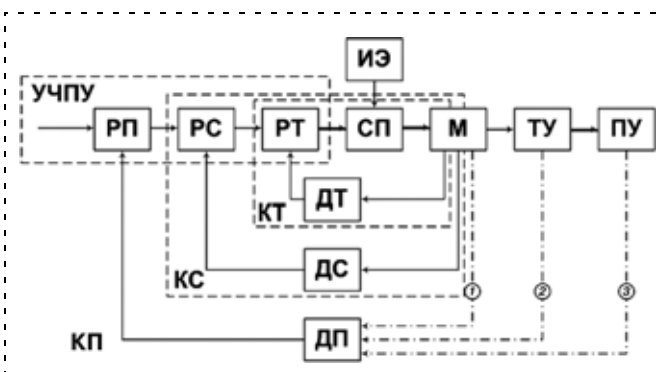


Рис. 1. Структурная схема следящего привода подачи

да. В них сравнивается фактический сигнал от обратной связи с управляющим сигналом. Разность этих двух сигналов после соответствующего преобразования подается на вход объекта управления, в качестве которого могут выступать внутренние контуры или силовая часть привода.

Основной, внешний контур — контур положения. Он включает: регулятор положения (РП), датчик перемещения (ДП), регулируемый привод (КС), тяговое устройство (ТУ) и перемещаемый узел (ПУ). В зависимости от требований, предъявляемых к точности привода, и в соответствии с его конструктивными особенностями обратная связь по перемещению может охватывать не только двигатель 1 или компоненты тягового устройства 2, но и перемещаемый узел 3. Основным элементом обратной связи по положению является датчик перемещения, в котором формируется сигнал, содержащий информацию о перемещении. Современный регулятор положения имеет достаточно сложную структуру, включающую в себя интерполаторы, фильтры, компараторы (элементы сравнения), ограничители предельных значений управляющего воздействия и дополнительные контуры управления. Однако его основой является классический пропорциональный регулятор.

Как показала практика, введение в регулятор интегрирующего звена может отрицательно влиять на быстродействие и запас устойчивости контура положения. Поэтому в следящих системах более предпочтительным оказывается применение принципа предварительного (комбинированного) управления, т. е. управления и по отклонению и по возмущению. На вход контура скорости подается дополнительный корректирующий сигнал, который предназначен для компенсации инерционности контура скорости. Введение компенсирующего скоростного сигнала повышает порядок астатизма следящего привода относительно задания по перемещению. Важно отметить, что компенсирующий сигнал не оказывает влияния на устойчивость следящего электропривода.

Замыкание контура положения может осуществляться или непосредственно в контроллере привода или в устройстве управления верхнего уровня (УЧПУ станка). В первом случае удастся существенным образом повысить быстродействие контура положения, а во втором проще обеспечить согласованную совместную работу нескольких приводов.

Для построения замкнутой системы следящего привода, вообще говоря, достаточно лишь одного внешнего контура, содержащего информацию о перемещении. Однако из теории управления известно, что наличие информации не только о выходной величине (пути), но и ее производных (скорости и ускорении) дает возможность достаточно точно сформировать требуемую форму переходных процессов, иначе говоря, создать систему с заданными динамическими характеристиками.

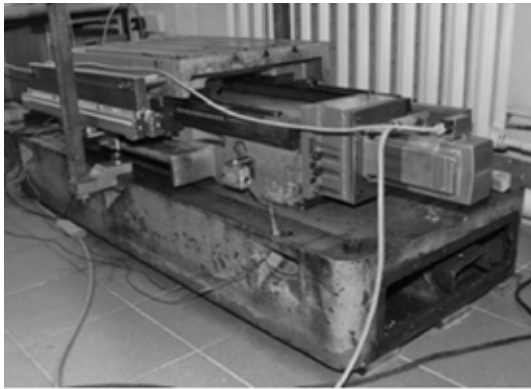
Регулируемый привод (КС) представляет собой систему автоматического регулирования и стабилизации скорости, на которую действует, в основном, возмущение в виде изменения нагрузки. Он включает: регулятор скорости (РС), датчик скорости (ДС) и КТ с двигателем (М). В состав регулятора скорости входят фильтры, компараторы (элементы сравнения), ограничители предельных значений управляющего воздействия и дополнительные контуры, реализующие комбинированное и адаптивное управление. Однако его основой является классический ПИ-регулятор, обеспечивающий астатизм регулируемого привода по скорости.

КТ обеспечивает обратную связь по току двигателя (т. е. по нагрузке), которая улучшает динамические свойства привода, в том числе динамическую жесткость, и позволяет организовать эффективное ограничение по силе тока. Он включает: регулятор тока (РТ), датчик тока (ДТ) и силовую часть, состоящую из силового преобразователя (СП) и двигателя (М). В качестве источника энергии (ИЭ) для СП, как правило, выступает трехфазный выпрямитель, обеспечивающий возможность рекуперации энергии в сеть. В состав регулятора тока входят ПИ-регулятор и дополнительные контуры адаптивного управления и компенсации влияния ЭДС двигателя. Совместное действие ПИ-регулятора и контура компенсации влияния ЭДС двигателя обеспечивает астатизм контура тока.

Все средства, перечисленные выше, призваны обеспечить требуемые динамические характеристики и точность привода подачи. Часто они используются для компенсации несовершенства конструкции его механической части, что приводит к недоиспользованию возможностей комплектного регулируемого привода.

Процесс проектирования привода подачи сводится к обоснованному выбору регулируемого привода и датчика положения, после чего проектируются направляющие перемещаемого узла и тяговое устройство. В основе выбора регулируемого привода и основных параметров тягового устройства лежат их энергетические, силовые и кинематические характеристики (мощность и момент привода, грузоподъемность и шаг передачи винт—гайка качения, требуемый диапазон частот вращения двигателя и т. п.). В дальнейшем проводится оценка ресурса передачи (расчет на долговечность). Фактически, на этапе проектирования привода подачи анализ его динамических характеристик не проводится. Следствием такого подхода является недостаточная обоснованность принимаемых конструктором решений в отношении динамического качества и точности привода подачи.

Основным препятствием для проведения динамических расчетов привода подачи является отсутствие математических моделей, адекватно описывающих взаимодействие его механической и электрической частей. Главной проблемой для специалистов-станочников является моделирова-



а)



б)

**Рис. 2. Экспериментальный стенд:**

а — экспериментальный стенд; б — двигатель, отсоединенный от ходового винта, привод, контроллер

ние, в основном, электрической части привода. Целью своих исследований авторы статьи считали получение с помощью экспериментальных исследований и имитационного моделирования максимально простой модели электромеханической части привода, включая двигатель и контуры обратной связи, с удовлетворительной степенью достоверности качественно и количественно воспроизводящей процессы в современных следящих приводах подачи. Результаты проделанной работы изложены в данной статье.

В качестве объекта для проведения исследований был выбран экспериментальный стенд, собранный на кафедре "Станки" МГТУ "Станкин" (рис. 2). Конструктивно стенд кафедры "Станки" оформлен в виде станины с закрепленными на ней прямолинейными направляющими качения, по которым с помощью передачи винт—гайка качения перемещается стол. Вращение ходового винта осуществляется вентильным двигателем, закрепленным на этой же станине. Для этой цели используются поочередно двигатели марки 1FT7046-5AF70-1FH0 и 1FK7061-7AF71-1FH0, управляемые приводом SINAMICS S120 производства "Siemens" (контроллер — SIMOTION D435). Для проведения экспериментов двигатели отсоединяли от ходового винта, а в качестве датчика перемещения использовали встроенный фотоэлектрический датчик дви-

гателя. Особенностью системы управления приводом является отсутствие специального датчика для измерения частоты вращения двигателя. Информация о фактической скорости вращения получается путем дифференцирования сигнала с датчика положения. Основные параметры двигателей и привода приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Экспериментальные исследования проводили с помощью диагностической системы, являющейся частью программного обеспечения устройства управления приводами и контроллера верхнего уровня. Эта система позволяет выполнять качественный и количественный анализ характеристик привода без специальной аппаратуры, обеспечивая большое разнообразие входных диагностических сигналов. Учитывая особенности поставленной задачи, перечень исследований был ограничен определением логарифмических амплитудно-частотных (ЛАЧХ) и фазово-частотных (ЛФЧХ) характеристик контуров привода и их реакции на скачок управляющего сигнала.

Имитационное моделирование проводили в среде моделирования динамических систем Simulink, входящей в состав системы инженерных и научных

Таблица 1

**Основные параметры двигателей**

Параметры двигателей	1FT7046-5AF70-1FH0	1FK7061-7AF71-1FH0
Момент инерции ротора со стояночным тормозом ( $J$ ), кг · м <sup>2</sup>	0,000839	0,000374
Постоянная крутящего момента ( $K_M$ ), Н · м/А	1,75	1
Сопротивление обмотки ( $R_s$ ), Ом	1,55	0,74
Индуктивность обмотки ( $L_s$ ), Гн	0,011	0,02
Электрическая постоянная времени ( $T_s$ ), с	0,006	0,027
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	3000	3000
Номинальный момент, Н · м	5,6	5,4
Максимальный крутящий момент, Н · м	31	17,3
Максимальный ток, А	19	17,5

Таблица 2

**Основные параметры приводов**

Параметры привода	SINAMICS S120	
	1FT7046-5AF70-1FH0	1FK7061-7AF71-1FH0
Коэффициент усиления частотного преобразователя ( $K_{\Pi}$ ), В	400	400
Такт SINAMICS Integrated ( $\tau$ ), мкс	125	125
Такт SIMOTION Runtime ( $\tau_0$ ), мкс	125	125
Коэффициент усиления регулятора положения ( $K_{\text{pp}}$ ), 1/с	382	382
Коэффициент усиления регулятора положения ( $K_{\text{pc}}$ ), Н · м · с/рад	1,04	0,46
Постоянная времени регулятора скорости ( $T_{\text{pc}}$ ), мс	1,31	1,31
Коэффициент усиления регулятора тока ( $K_{\text{pt}}$ ), В/А	18,6	40
Постоянная времени регулятора тока ( $T_{\text{pt}}$ ), мс	6	27

вычислений MATLAB. Основная проблема моделирования заключалась в выборе максимально простой модели силовой части привода, включающей двигатель и управляемый источник питания (преобразователь частоты).

Из работ [2, 3] следует, что модель вентильного двигателя с неявнополюсным ротором, представленная во вращающейся системе координат  $q - d$ , жестко связанной с ротором, отличается от модели двигателя постоянного тока наличием перекрестных связей между проекциями тока статора на оси  $q$  и  $d$ . В работе [3] показано, что влияние перекрестных связей в двигателе с явнополюсным ротором при большом значении питающего обмотки напряжения ( $U_q = 200$  В,  $U_d = 0$  В) проявляется в затягивании переходных процессов в вентильном двигателе. При меньшем на порядок значении питающего напряжения переходные процессы в сравниваемых двигателях практически идентичны. Собственные исследования авторов показали, что в двигателях с неявнополюсным ротором, охваченных обратной связью по току, затягивание переходных процессов невелико и при больших значениях питающего напряжения. Принимая во внимание, что точные установочные перемещения и контурная обработка проводятся при относительно невысоких скоростях и небольших нагрузках, было принято решение в качестве исходной выбрать модель двигателя постоянного тока. На структурной схеме контура скорости (рис. 3) моделируемый двигатель представлен в виде последовательного соединения аperiodического и интегрирующего звеньев, охваченного обратной связью по угловой скорости.

Преобразователь частоты изменяет напряжение и частоту тока двигателя в соответствии с задани-

ем, обеспечивая изменение частоты вращения и момента на валу двигателя. В линейном приближении преобразователь частоты с широтно-импульсной модуляцией обычно принято рассматривать [2, 3] как звено чистого запаздывания с передаточной функцией  $W_{\text{пр}}(s) = K_{\text{пр}}e^{-\tau s}$ . Время чистого запаздывания  $\tau$  обычно принимается равным периоду коммутации. Поскольку частота коммутации в современных преобразователях достаточно велика (4...16 кГц),  $\tau$  мало, экспоненту обычно заменяют линейной зависимостью. Этот прием позволяет представить преобразователь аperiodическим звеном  $W_{\text{пр}}(s) = K_{\text{пр}}/(1 + \tau s)$  [2, 3, 4]. В целом ряде практических приложений [4, 5] малая постоянная  $\tau$  вообще не учитывается и преобразователь считается пропорциональным звеном.

На начальном этапе имитационного моделирования частотный преобразователь рассматривался авторами как звено чистого запаздывания. Анализ экспериментальных ЛАЧХ и ЛФЧХ контура тока, полученных при частотах коммутации преобразователя 4, 8 и 16 кГц, показал, что они практически идентичны, и существующее фазовое рассогласование между расчетными и экспериментальными фазово-частотными характеристиками не может быть объяснено запаздыванием в преобразователе. Было установлено, что источником запаздывания в системе являются задержки при передаче информации: между модулем управления и элементами силовой части привода; между датчиками и модулем управления в обратных связях; между элементами модуля управления. В дальнейшем преобразователь частоты считался пропорциональным звеном с соответствующим коэффициентом усиления (рис. 3, а), а задержки при передаче информации рассматривались как звенья чистого запаздывания

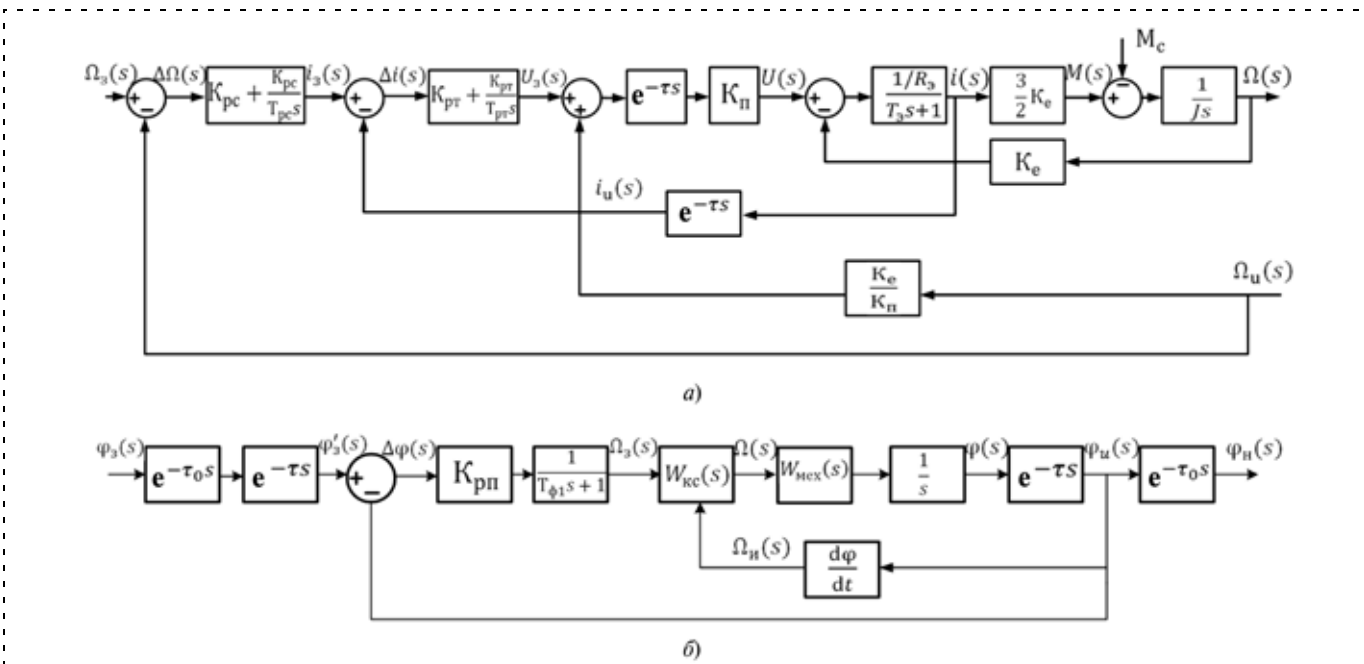


Рис. 3. Структурная схема модели следящего привода: а — регулируемый привод; б — контур положения



с единичным коэффициентом усиления. В ходе исследований были определены места их расположения и получены количественные оценки запаздывания в системе (рис. 3, а, б). Запаздывание соответствует тактам контуров регулирования тока, скорости и положения.

Анализ полученной экспериментальным путем реакции на скачкообразный входной сигнал для контура тока показал, что он обладает астатизмом по отношению к управляющему воздействию. Однако из теории известно, что ПИ-регулятор не может обеспечить астатизм контура тока из-за действия обратной связи по ЭДС двигателя [4]. Полученный результат заставляет предположить наличие в контуре тока специальных элементов, обеспечивающих компенсацию действия ЭДС. Наиболее простой способ компенсации заключается в измерении скорости и организации сигнала положительной обратной связи по ЭДС, подаваемого вместе с управляющим воздействием на вход преобразователя частоты [6]. Для измерения скорости нет необходимости использовать дополнительное устройство, так как для этих целей может быть использована информация, уже имеющаяся в контуре скорости.

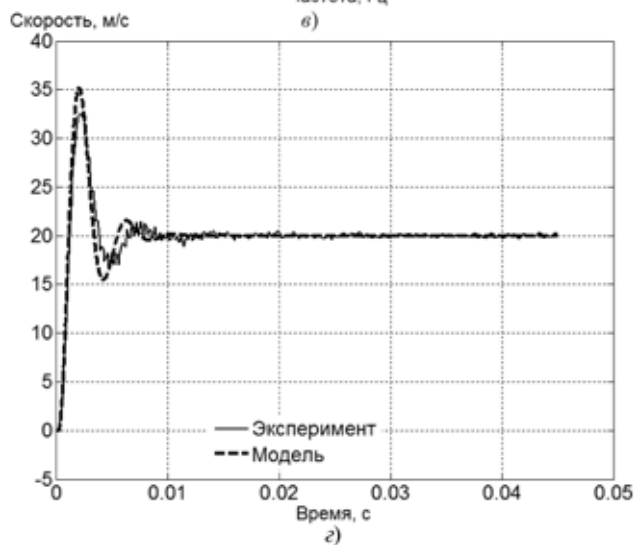
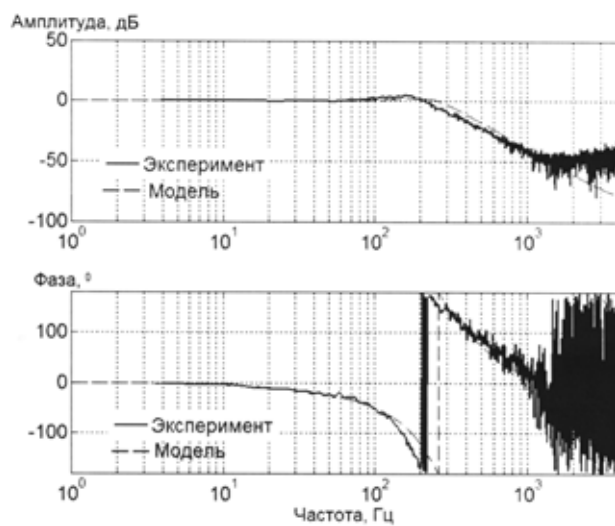
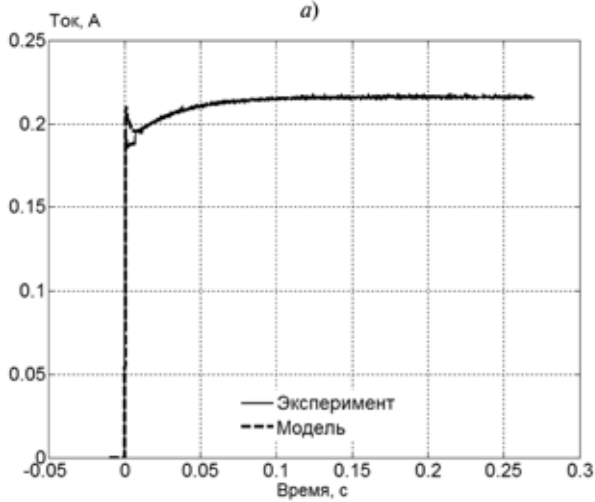
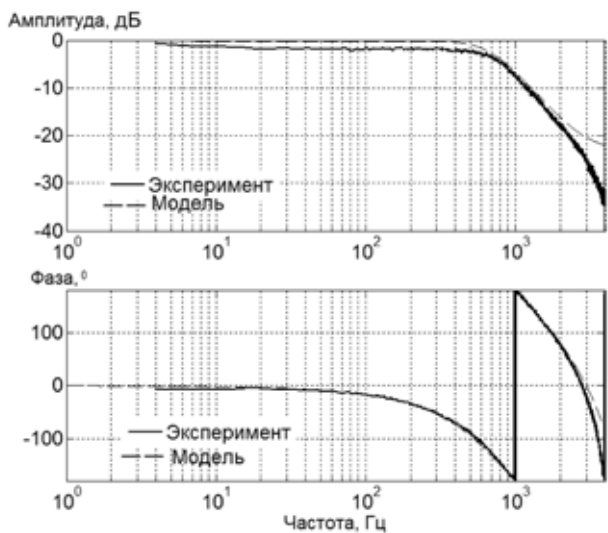
Полученная в результате проведенных исследований модель представлена на рис. 3. На рис. 3, а показана структурная схема двух внутренних контуров следящего привода, в том числе его силовой части и обратных связей по ЭДС двигателя, току и скорости. Она соответствует всем перечисленным выше допущениям. Обозначения параметров модели на схеме:  $T_3 = L_3/R_3$  — электромагнитная постоянная времени статорной обмотки;  $L_3$  — индуктивность статорной обмотки;  $R_3$  — сопротивление статорной обмотки;  $K_{\Pi}$  — коэффициент усиления частотного преобразователя;  $K_c = 2K_M/3$  — электрическая постоянная двигателя;  $J$  — момент инерции двигателя;  $\tau$  — постоянная времени звена чистого запаздывания, учитывающая временные задержки при передаче информации в контуре тока. В контурах используются типовые ПИ-регуляторы с коэффициентами усиления и постоянными времени  $K_{\text{рт}}$  и  $T_{\text{рт}}$ ,  $K_{\text{рс}}$  и  $T_{\text{рс}}$  для управления током и скоростью соответственно. На схему нанесены основные переменные модели:  $\Omega_3(s)$ ,  $\Omega(s)$  и  $\Omega_{\text{и}}(s)$  — заданная, действительная и измеренная скорости двигателя;  $\Delta\Omega(s)$  — рассогласование между заданной и измеренной скоростями;  $i_3(s)$ ,  $i(s)$  и  $i_{\text{и}}(s)$  — проекции заданного, действительного и измеренного тока в обмотках двигателя на ось  $q$ ;  $\Delta i(s)$  — рассогласование между проекциями заданного и измеренного тока;  $u_3(s)$  и  $u(s)$  — проекции заданного и действительного напряжения, приложенного к обмоткам двигателя на ось  $q$ ;  $M(s)$  и  $M_c(s)$  — момент развиваемый двигателем и момент сопротивления.

На рис. 3, б показана структурная схема контура положения. Обозначения параметров модели, указанных на схеме:  $W_{\text{кс}}(s)$  — передаточная функция

контура скорости;  $\tau$  — постоянная времени звена чистого запаздывания, учитывающая временные задержки при передаче информации в контуре положения;  $\tau_0$  — постоянная времени звена чистого запаздывания, учитывающая временные задержки при передаче информации между модулями контроллера;  $K_{\text{рп}}$  — коэффициент усиления регулятора положения;  $T_{\text{ф}} = T_{\text{рс}}$  — постоянная времени фильтра в цепи задания скорости. На схему нанесены основные переменные модели:  $\varphi_3(s)$ ,  $\varphi'_3(s)$ ,  $\varphi(s)$ ,  $\varphi_{\text{и}}(s)$  и  $\varphi_{\text{н}}(s)$  — заданный, заданный с учетом запаздывания при передаче информации, действительный, измеренный и наблюдаемый углы поворота ротора двигателя. Временные задержки  $\tau_0$  в разомкнутой части контура положения приводят к тому, что ЛФЧХ наблюдаемого сигнала имеет дополнительный фазовый сдвиг, отсутствующий в действительном и измеренном сигналах. Причина возникновения задержки заключается в том, что SIMOTION D435 включает в себя два модуля управления, работающие с разным тактом. SIMOTION Runtime, осуществляющий согласованное взаимодействие приводов и связь с дополнительной внешней периферией и устройствами управления верхнего уровня, имеет такт, равный 1 мс, а SINAMICS Integrated, выполняющий непосредственное управление контурами привода, работает с тактом 125 мкс. Так как диагностическая система контура положения является частью программного обеспечения первого из двух модулей, при ее функционировании возникает временная задержка, равная удвоенной сумме их тактов. Эту особенность диагностической системы надо учитывать при оценке динамического качества привода.

ЛАЧХ, ЛФЧХ и реакция на скачкообразный входной сигнал являются основными показателями, определяющими динамические свойства исследуемой системы. На рис. 4 показаны соответствующие характеристики контуров тока, скорости и положения следящего привода с двигателем 1FK7061-7AF71-1FN0, полученные в результате измерений и расчетным путем. Значения параметров модели и настроек регуляторов реального привода взяты из табл. 1 и 2. Сравнительный анализ результатов позволяет сделать вывод о близком соответствии модели и реальной системы при заданных настройках. Контуров тока и скорости реального привода имеют несколько лучшие диссипативные свойства, что, по всей видимости, определяется действием специальной внутренней модели контура тока, структура и параметры которой скрыты от пользователей.

Для оценки чувствительности контуров привода к изменению настроек регуляторов были исследованы их характеристики при различных значениях коэффициентов усиления и постоянных времени интегрирования регуляторов тока и скорости. Коэффициенты усиления и постоянные времени регуляторов увеличивались и уменьшались в два раза по сравнению с табличными значениями. Были

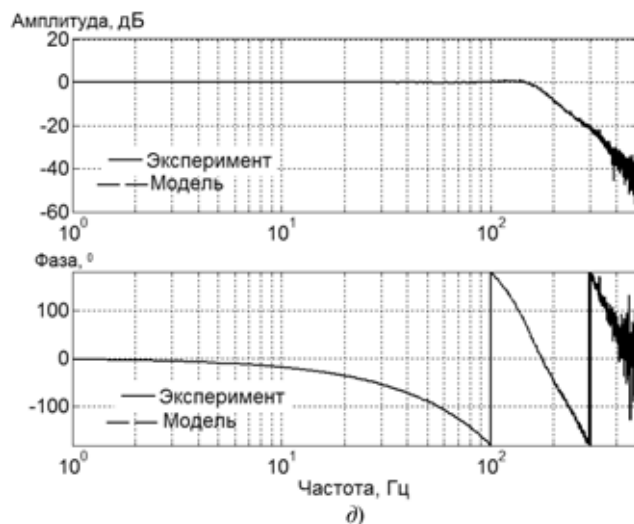


проведены вычислительные и натурные эксперименты при девяти возможных сочетаниях  $K_{рт}$  и  $T_{рт}$ . Аналогичные исследования были выполнены и для контура скорости.

Сравнительный анализ результатов показал, что:

- контур тока реального привода сохраняет устойчивость во всех девяти случаях;
- исследуемые характеристики контура тока модели находятся в хорошем качественном и количественном соответствии с характеристиками реального контура;
- контур тока реального привода сохраняет лучшие диссипативные свойства при всех сочетаниях изменяемых параметров.

Контур скорости реального привода обладает большей робастностью при увеличении коэффициентов усиления в два раза или при соответствующем снижении постоянных времени интегрирования регулятора. При одновременном двукратном увеличении  $K_{рс}$  и уменьшении  $T_{рт}$  и реальный привод, и его модель теряют устойчивость. При соответствующем снижении коэффициентов усиления и увеличении постоянных времени регуляторов исследуемые характеристики контура скорости



**Рис. 4.** Реакция контуров тока, скорости и положения следящего привода с двигателем 1FK7061-7AF71-1FN0 на различные входные воздействия:

- $a$  – ЛАЧХ и ЛФЧХ передаточной функции  $W_{кт}(s) = i(s)/i_3(s)$ ;
- $b$  – реакция контура тока на скачок управляющего сигнала;
- $в$  – ЛАЧХ и ЛФЧХ передаточной функции  $W_{кс}(s) = \Omega(s)/\Omega_3(s)$ ;
- $г$  – реакция контура скорости на скачок управляющего сигнала;
- $д$  – ЛАЧХ и ЛФЧХ передаточной функции  $W_{кп}(s) = \varphi_H(s)/\varphi_3(s)$

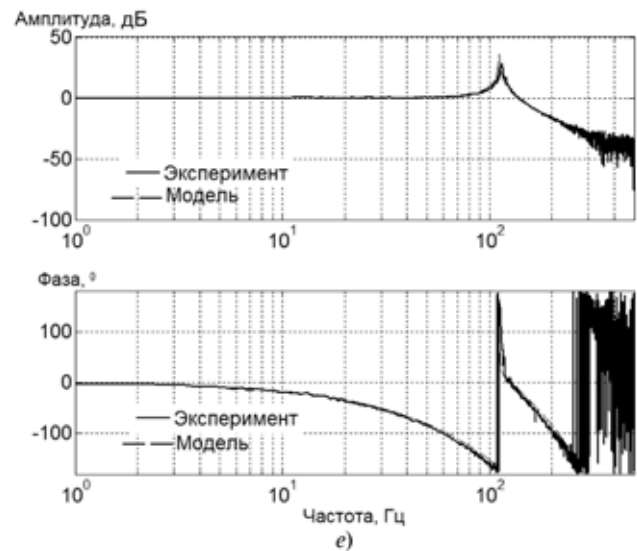
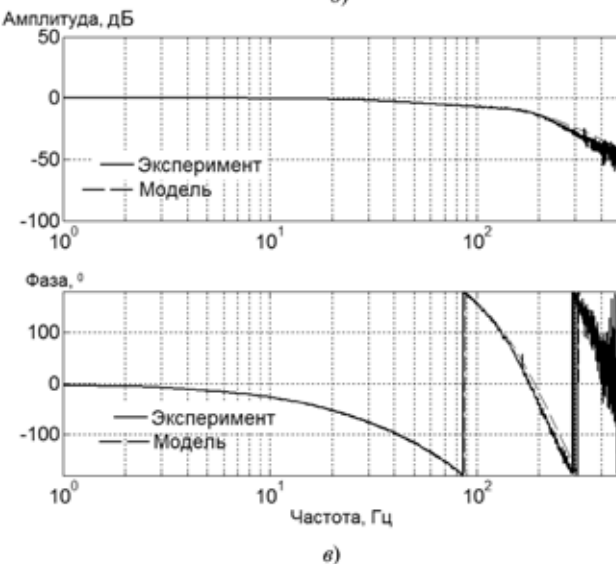
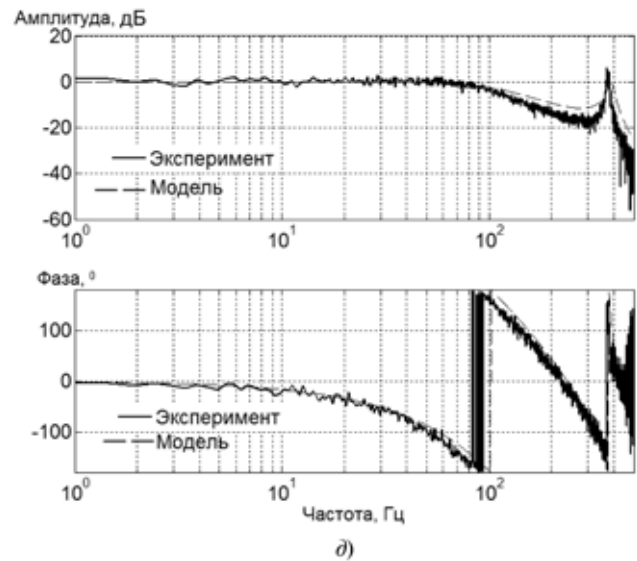
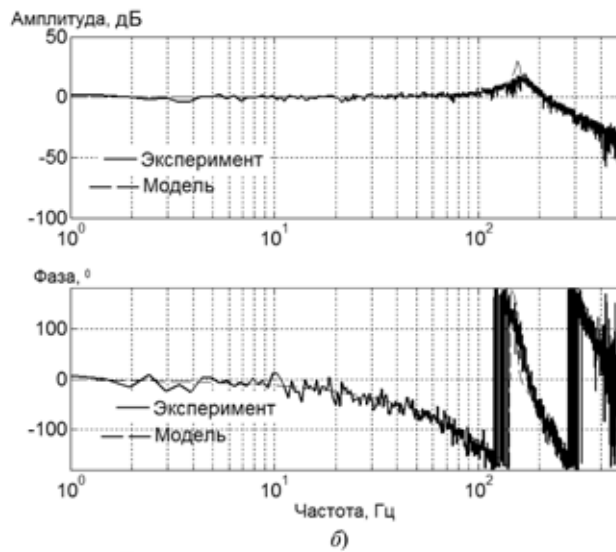
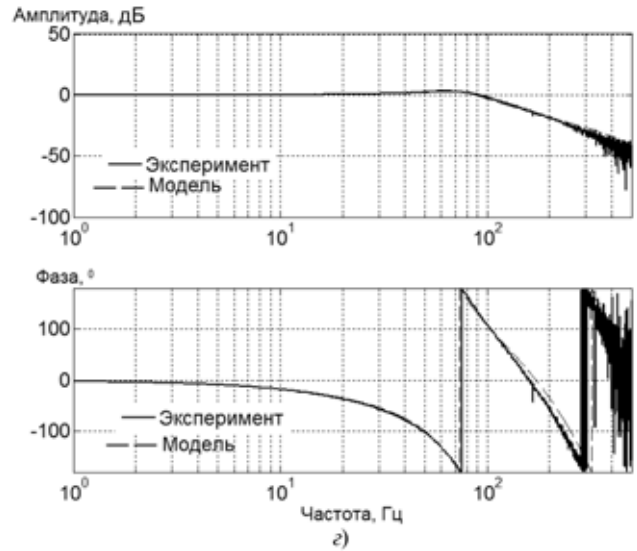
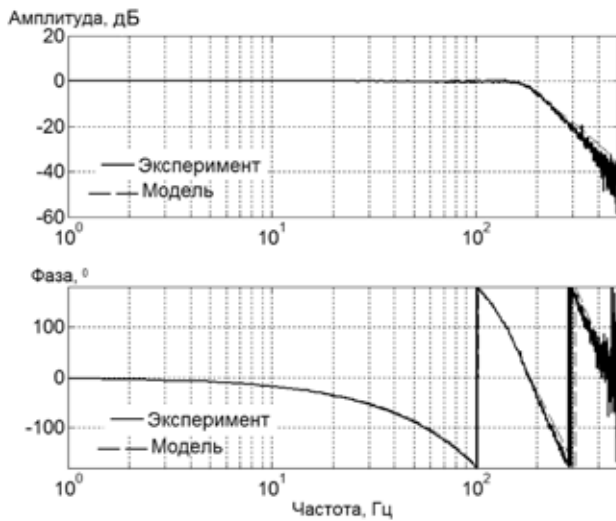


Рис. 5. ЛАЧХ и ЛФЧХ контура положения следящего привода с двигателем 1FT7046-5AF70-1FH0 при различных коэффициентах усиления контуров положения и скорости:  
*a* –  $K_{рп} = 382$  1/с; *б* –  $K_{рп} = 764$  1/с; *в* –  $K_{рп} = 191$  1/с; *г* –  $K_{рс} = 0,59$  А·с/рад,  $T_{рс} = 2,62$  мс; *д* –  $K_{рс} = 1,18$  А·с/рад,  $T_{рс} = 1,31$  мс; *е* –  $K_{рс} = 0,3$  А·с/рад,  $T_{рс} = 1,31$  мс

модели находятся в хорошем качественном и количественном соответствии с характеристиками реального контура.

Такие же исследования были проведены и для следящего привода с двигателем 1FT7046-5AF70-1FH0. Они привели к аналогичным результатам. На рис. 5 приведены логарифмические частотные характеристики контура положения привода с двигателем 1FT7046-5AF70-1FH0 при различных значениях коэффициентов усиления контуров положения, скорости и постоянной времени регулятора контура скорости. Значения коэффициентов усиления контуров и постоянной времени поочередно увеличивались и уменьшались в два раза по сравнению с табличными значениями. При двукратном уменьшении  $T_{pc}$  и табличных  $K_{pc}$  и  $K_{rp}$  реальный привод и его модель теряют устойчивость. Сравнительный анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что исследуемые характеристики контура положения модели находятся в хорошем качественном и количественном соответствии с характеристиками реального контура.

### Выводы

1. Достаточно простая имитационная модель, основанная на использовании двигателя постоянного тока, с удовлетворительной степенью достоверности качественно и количественно воспроизводит процессы в контурах управления современных приводов подачи.

2. Информационные задержки оказывают существенное влияние на динамические процессы в

контурах управления привода и должны учитываться при его проектировании и расчете.

3. Наблюдаемые, измеренные и действительные фазово-частотные характеристики привода могут существенным образом различаться из-за разницы типов модулей управления контроллера.

4. Реальный привод обладает большей робастностью, чем линейная математическая модель, что, по всей видимости, является следствием действия скрытых от пользователя специализированных модулей, структура которых является коммерческой тайной фирмы "Siemens".

5. Представленная модель может быть использована на ранних стадиях проектирования (при разработке эскизного и технического проектов) для оценки динамического качества станочных приводов подачи, механическая часть которых может рассматриваться как абсолютно жесткое тело.

### Список литературы

1. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Машиностроение, 2006. 256 с.
2. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учеб. для вузов. М.: Издательский центр "Академия", 2006. 272 с.
3. Герман-Галкин С. Г. MatLab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
4. Терехов В. М., Осипов О. И. Системы управления электроприводов: учеб. для вузов. М.: Издательский центр "Академия", 2005. 304 с.
5. Следящие приводы: В 3 т. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Б. К. Чемоданова. Т. 2: Электрические следящие приводы. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 880 с.
6. Михайлов О. П. Динамика электромеханического привода металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1989. 224 с.

*Информация*

26—28 октября 2010 г. в Москве в ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН состоится  
V Международная конференция

## "Параллельные вычисления и задачи управления"

(PACO'2010)

### Тематические направления:

- Математические модели, вычислительные методы, программы и архитектуры распараллеливания вычислений
- Технологии программирования параллельных и распределенных систем
- Параллельные и распределенные вычисления в задачах моделирования, анализа, идентификации, управления и оптимизации
- Проблемы совместного проектирования и синтеза параллельных программ и архитектур
- Проблемы интеграции данных, программ, процессов и систем в глобальной компьютерной среде
- Архитектуры распределенных вычислительных и управляющих систем в компьютерных сетях
- Надежные вычисления и защита информации в распределенных компьютерных средах
- Компьютерные системы с самообучением и самоорганизацией
- Презентации проектов вычислительных и управляющих систем с параллельной и/или распределенной обработкой информации

Тел. (495) 334-87-69, <http://paco.ipu.ru>, e-mail: [atlas@ipu.ru](mailto:atlas@ipu.ru)

**И. Л. Ермолов<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, доц.,

**В. Н. Никитин<sup>2</sup>**, начальник группы,

**С. А. Собольников<sup>1</sup>**, аспирант,

<sup>1</sup> Московский государственный технологический университет "СТАНКИН",

<sup>2</sup> Московский филиал ФГУП АТЦ СПб

Инженерно-технический и учебный

центр робототехники (ИТУЦР),

ermolov@stankin.ru

## Интерактивный тренажер для операторов мобильных роботов с элементами актуальной адаптации

*Обучение человека-оператора является важным аспектом эффективности функционирования эргатической системы человек—машина. При этом особый упор в обучении оператора надо делать на адекватность применяемых методов обучения и тренажеров реальным системам. В данной статье представляется новый вид тренажера, способного к адаптации с учетом реальных образцов мобильных роботов.*

**Ключевые слова:** обучение оператора, тренажеры, мобильные роботы

В настоящее время активно развиваются работы по созданию мобильных роботов (МР) различного применения. Высокие тактико-технические характеристики и оснащенность роботов специализированным навесным оборудованием позволяют решать целый ряд задач, таких как выполнение монтажно-демонтажных, регламентных и ремонтных работ, разминирование и эвакуация взрывчатых веществ, ликвидация последствий чрезвычайных ситуаций, инспекция различных объектов, труднодоступных для человека, и множество других операций. Одним из предприятий, занимающихся разработкой робототехнических средств для ликвидации последствий инцидентов, связанных с радиационным фактором, является Московский филиал ФГУП АТЦ СПб Инженерно-технический и учебный центр робототехники (ИТУЦР) — головное предприятие государственной корпорации "Росатом" по разработке и применению технологий с использованием дистанционно управляемой экстремальной робототехники (рис. 1).

Спецификой работы мобильного робота в недетерминированных средах, в том числе и радиоактивной, является дистанционное управление человеком-оператором. Действительно, при дистанционном управлении оператор имеет возможность достаточно объективно оценить ситуацию, сложившуюся в рабочей зоне.

Способность к принятию решений человека достаточно совершенна, чтобы обеспечить управление роботом при выполнении весьма сложных операций без привлечения мощных вычислительных и других дорогостоящих технических средств, входящих в состав автономного робота.

Степень участия человека-оператора в эргатической системе "человек—робот" [5] не только определяется сложностью выполняемой операции, но и существенно зависит от структуры самой системы и принципа дистанционного управления. Так, при командном, копирующем и полуавтоматическом видах управления человек постоянно обеспечивает формирование движений исполнительного устройства. Супервизорное и диалоговое управления позволяют в значительной степени освободить человека от выполнения простейших, повторяющихся движений и работать в режиме диспетчирования действий робота. Весьма эффективными при выполнении разнообразных операций с помощью роботов являются системы комбинированного дистанционно-автоматического управления. В подобных робототехнических системах оператор подключается к управлению лишь в моменты выполнения наиболее сложных действий робота.

Все это свидетельствует о возможности широкого привлечения методов дистанционного управления в условиях радиоактивного излучения, где необходимо выполнять сложные операции исследовательского характера, проводить монтажно-демонтажные и сборочные работы с использованием универсального инструмента или оснастки.

ИТУЦР решает множество практических задач, связанных с созданием и эксплуатацией такого оборудования. Очень важной проблемой представляется обучение операторов мобильных роботов необходимым навыкам работы с подобными техническими системами. В связи с этим Центр активно ведет разработки тренажерных комплексов.

### Обучение операторов мобильных роботов

Исторически тренажерные технологии возникли и получили наибольшее развитие там, где ошибки обучения при работе на реальных объектах могут привести к чрезвычайным последствиям, а



Рис. 1. Мобильные роботы ИТУЦР

их устранение — к большим финансовым затратам: в военном деле, медицине, ликвидации последствий стихийных бедствий, в атомной энергетике, авиации и космосе, высокотехнологичном производстве и т. п. То же, безусловно, можно сказать и об области управления роботами.

Поскольку управление такими комплексными техническими устройствами — сложный процесс, неопытный оператор не способен решать серьезные задачи на высокотехнологичном оборудовании, а такие попытки часто ведут к выводу оборудования из строя. Примером могут послужить данные о том, что большинство мобильных роботов, потерянных оккупационными силами в Ираке, были выведены из строя именно по вине операторов. Поэтому обучение операторов мобильных роботов является чрезвычайно важной задачей. При этом наиболее важным направлением развития обучающих систем являются компьютерные тренажеры, позволяющие значительно сократить время и затратность тренировок по сравнению с обучением на реально действующих прототипах с одновременным повышением качества обучения за счет большего многообразия виртуальных тренировочных сцен, часто недоступных при традиционных методах обучения.

В обучении оператора можно выделить два этапа. Первый — ориентировочная деятельность. Именно здесь формируются ассоциации, т. е. сложные условные рефлексы, создающие основу будущей деятельности. Обучение в данном случае основывается на рассказе о сущности профессиональных операций, последовательности их выполнения, на показе преподавателем порядка выполнения отдельных элементов и операций в целом, на мысленном воспроизведении обучаемым последовательности выполнения этих операций. Второй этап — обучение оператора управлению техникой уже на конкретных типовых режимах работы, а также в режиме имитации аварийных ситуаций.

Выработка и координация профессиональных движений невозможны без чувственного контроля, без афферентной обратной связи, которая осуществляется, прежде всего, через зрительный анализатор.

Поэтому большое внимание в процессе обучения оператора мобильного робота уделяется технологиям трехмерного моделирования и пользовательскому интерфейсу. Грамотно разработанный и удобный интерфейс может значительно ускорить процесс обучения и упростить управление самим мобильным роботом, а работа с трехмерными изображениями, которые способны достаточно точно воспроизводить поведение реального объекта, является наилучшим средством получения навыков управления. Эффективность высокореалистичного трехмерного моделирования объясняется тем, что обучаемый фактически полностью погружается в реальный процесс управления мобильным роботом. При этом возможно моделирование всех ре-

жимов работы, в том числе возникновение нестандартных ситуаций, что особенно важно.

Одной из основных особенностей, которая объясняет такой эффект применения технологии трехмерного моделирования, является использование трехмерной графической окружающей среды. В ней осуществляется интерактивное динамическое взаимодействие моделей роботов с виртуальными объектами в режиме реального времени, что актуально для задач обучения, предполагающих использование полученных навыков в дистанционном управлении их физическими прототипами. Человек быстрее и легче воспринимает графическую информацию, чем текст или данные. Для программных приложений управления мобильными роботами трехмерное моделирование является очень ценным инструментом, позволяя осуществлять планирование, предварительный обзор и прогнозирование действий робота. Кроме того, виртуальная система позволяет создавать насыщенную виртуальную окружающую среду, обучающие сценарии, варианты конфигураций роботов, осуществлять записи учебных процессов для их последующего анализа и многое другое. Создание удобного пользовательского интерфейса и применение технологий компьютерного моделирования — основные требования, предъявляемые к современным тренажерным комплексам.

### Тренажеры

Современные тренажерные технологии — это сложные программно-аппаратные комплексы, включающие системы моделирования и симуляции, системы визуализации, компьютерные программы и физические модели, специальные методики, создаваемые для того, чтобы подготовить человека к принятию эффективных решений.

В современных тренажерах и в программах подготовки и обучения, основанных на них, закладываются принципы развития практических навыков с одновременной теоретической подготовкой, т. е. тренажер способен развиваться вместе с обучаемым. Реализация такого подхода стала возможна в связи с бурным развитием компьютерной техники и прогрессом в области создания технологий виртуальной реальности, машинного зрения, систем искусственного интеллекта и т. п.

Типичный тренажер состоит из двух основных частей: пульта управления (пульт оператора) и части, моделирующей реальную робототехническую систему.

Рабочее место обычно является копией реального рабочего места оператора робота или имитацией интерфейса управления роботом. Динамический отклик тренажера должен быть практически идентичен отклику систем и компонентов реального процесса. Моделирующий комплекс включает математические модели объектов моделирования и управляет реакцией системы на действия оператора. Моделирующий комплекс связан с ин-

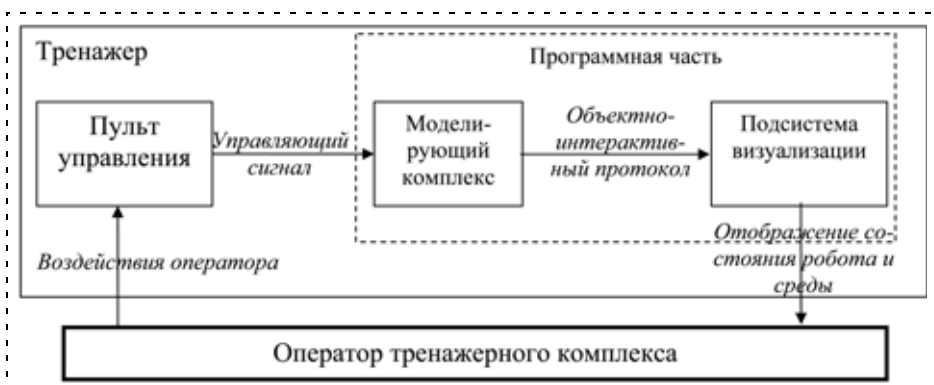


Рис. 2. Типовая структура тренажера [2]

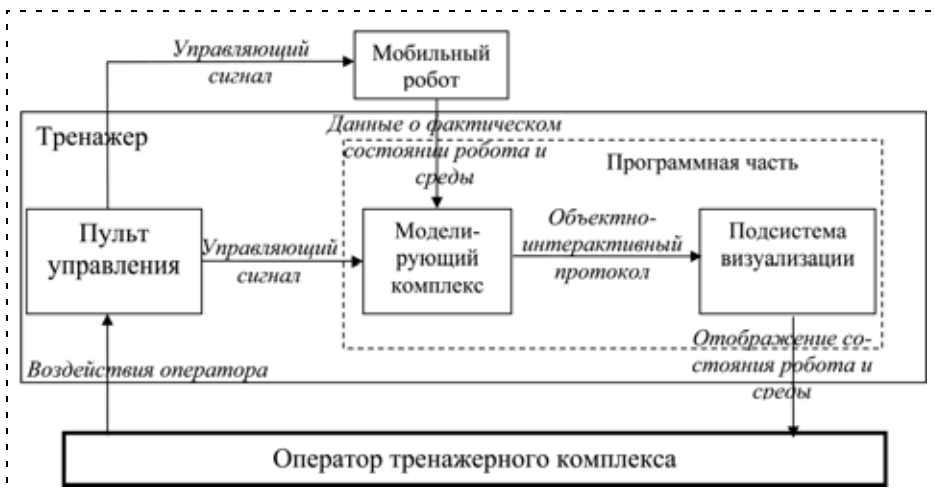


Рис. 3. Общая схема тренажера с элементами актуальной адаптации

терфейсом оператора через систему ввода — вывода. Подсистема визуализации предоставляет оператору визуальную информацию об имитируемых процессах. Программные модели реалистично в реальном масштабе времени отображают взаимодействие компонентов и систем моделируемого процесса. Типовая структура работы тренажера и взаимодействия его компонент и оператора представлена на рис. 2.

Желательно, чтобы тренажер был максимально адекватен моделируемой технической системе. Адекватность заключается не в том, чтобы отразить абсолютно все процессы, протекаемые в реальной робототехнической системе, а в том, чтобы учесть только те процессы, которые непосредственно оказывают влияние на требуемое качество работы. Таким образом, не требуется создавать тренажеры, которые превышают точность самой технической системы.

В тренажерной части системы надо предусматривать и визуализацию реальной рабочей сцены. На ней должен быть отображен робот в максимально правдоподобном виде и все препятствия в рабочей зоне.

Если манипулятор робота выполняет какую-то работу, то визуализировать требуется и те объекты рабочей сцены, с которыми проводятся манипуля-

ции. Эти объекты также имеют некие характеристики и параметры, которые требуется достаточно адекватно отобразить на экране. Например, для сборочного робота надо отображать детали как до установки их в требуемые позиции сборки, так и собираемый узел на разных этапах завершенности.

Проблемой многих современных тренажерных комплексов является недостаточная степень адекватности, ведь выбранный уровень адекватности может удовлетворять требованиям, предъявляемым к тренажеру в целом, но, в частности, может не учитывать некоторые важные моменты при симуляции моделей. Поскольку любая тренажерная система основывается на математических моделях, которые нередко обладают некоторыми допущениями, то некоторые детали сцен и роботов могут отражаться не вполне корректно. При этом каждый робот имеет как присущие определенной модели характеристики, так и индивидуальные особенности каждого отдельно взятого образца, на-

пример, образовавшийся во время эксплуатации люфт в муфтах колесных модулей. Эти особенности могут быть очень важны в процессе работы с реальным роботом. Практически во всех существующих тренажерах есть общая проблема отображения взаимодействия робота с разными объектами окружающей среды, например, при передвижении по разным типам поверхностей (песок, глина). Пробуксовка, налипание грязи на протектор могут оказать существенное влияние на поведение робота в реальной зоне производимых работ, и оператор может оказаться к этому не готов.

Решением этих проблем является применение новых видов тренажеров с актуальной адаптацией, которые способны отлаживать поведение компьютерной модели посредством связи с физической моделью или прототипом, т. е. с самим мобильным роботом. Реализовывая движение компьютерной модели согласно данным, получаемым от датчиков обратной связи мобильного робота, и сравнивая поведение реальной физической модели с графической, можно отследить все неточности, учитывать которые важно в процессе обучения. После этого можно исправить те из них, которые наиболее сильно влияют на работу робота. Тренажер с актуальной адаптацией может быть представлен структурной схемой, изображенной на рис. 3.

В таком типе тренажеров управляющий сигнал с пульта управления может передаваться как на модель робота в режиме тренировки, так и на сам робот в целях получения данных о фактическом состоянии мобильного робота для последующей настройки соответствующих параметров модели.

Предложенная система может быть также применена для отработки оператором управления реальным роботом в определенной зоне, которую сложно или нецелесообразно в точности копировать. Для этой зоны создается полигон, содержащий только макеты препятствий, которые могут встретиться роботу. В симуляторе же отражается компьютерная модель зоны во всех подробностях, передающая всю атмосферу рабочей зоны, тем самым создается эффект выполнения работы в реальной обстановке. Дело в том, что обучаемый часто делает ошибки, которые могут привести к поломке оборудования или долгосрочному и дорогостоящему ремонту. Поэтому макеты препятствий на полигоне можно создавать менее дорогостоящие, хрупкие, а также менее опасные для самого робота.

Все это позволяет оператору получить навыки работы с реальным роботом, ознакомиться со всеми тонкостями его поведения в виртуальной сцене, достаточно приближенной к реальной обстановке. Такая система может быть применима, например, для обучения операторов управлению роботом при проведении работ по сбору радиоактивных просыпей в центральном зале АЭС, а также в подреакторном пространстве, где в стесненных условиях требуется особая аккуратность.

#### **Разработка интерактивного тренажера с элементами актуальной адаптации для мобильного робота Pioneer 3-AT**

**Структура тренажера.** Разработанный тренажер представляет собой пример тренажера с элементами актуальной адаптации для мобильного робота Pioneer 3-AT (производитель MobileRobots, США).

Pioneer 3-AT (MobileRobots) — это универсальная вездеходная роботизированная платформа, включающая основные компоненты для ориентации и навигации в пространстве. Она может являться базовой платформой для широкого выбора исследовательских проектов.

3-AT на ровной поверхности способен двигаться со скоростью 0,7 м/с и размещать на себе полезную нагрузку массой до 30 кг. Полезная нагрузка может включать дополнительные аккумуляторы или другие периферийные устройства, которые должны быть соответственно сбалансированы для эффективного использования робота.

Основой функционирования тренажера является взаимодействие двух программных пакетов. Первый — это программное обеспечение ARIA, осуществляющее интерактивное управление мобильным роботом 3-AT посредством сетевого беспроводного соединения. Второй — комплекс

RobSim, используемый для программной симуляции моделей сложных механических систем (роботов) и людей в трехмерной среде. Структура разработанного тренажера изображена на рис. 4.

Клиентская часть приложения ARIA, расположенная на удаленном компьютере, обрабатывает данные, приходящие с задающего устройства от человека-оператора, и отправляет их через беспроводное соединение на серверную часть, установленную на бортовом компьютере робота. Серверная часть согласно полученным данным генерирует сигналы управления и через последовательное соединение отправляет их на микроконтроллер, который создает управляющие воздействия на приводы робота. В свою очередь, сигналы от датчиков обратной связи через контроллер и серверную часть ARIA передаются клиентской части удаленного компьютера. Дальше данные передаются в RobSim по связи, созданной между двумя процессами. Данные поступают в разработанную часть системы управления модели робота, которая преобразует их в управляющие сигналы приводов модели. Таким образом, была получена возможность дистанционного управления роботом с помощью стандартной клавиатуры или джойстика и наблюдения за поведением робота на удаленном компьютере с помощью графической модели.

Рассмотрим подробнее представленные программные пакеты.

Пакет RobSim разработан в ИТУЦР и представляет собой программный комплекс для моделирования робототехнических комплексов, предназначенных для ведения дистанционных работ, их трехмерного отображения в виртуальной среде и интерактивного управления в режиме реального времени.

Средства формирования виртуальной сцены этого пакета автоматически рассчитывают динамические модели всех помещенных в нее объектов и их взаимодействие между собой, а также отображают на экране тренажера трехмерную модель сцены. При этом используются развитые средства управления визуализацией, позволяющие выбирать ракурс для просмотра наиболее значимых моментов обучения [4].

Программный пакет ARIA создан компанией MobileRobots, США. Это созданная на языке C++ открытая среда разработки, обеспечивающая клиентскую сторону интерфейса для различных систем робота, таких как микроконтроллер и внешнее оборудование. ARNetworking обеспечивает сетевое соединение с мобильным роботом посредством TCP/IP-протокола.

ARIA/ARNetworking — это платформа для создания управляющего роботом программного обеспечения, имеющая необходимый уровень клиент-серверного взаимодействия: связь через последовательное соединение и сетевую связь, выдача управляющих команд и обработку данных с сервера, задание такта расчета и организацию многопо-



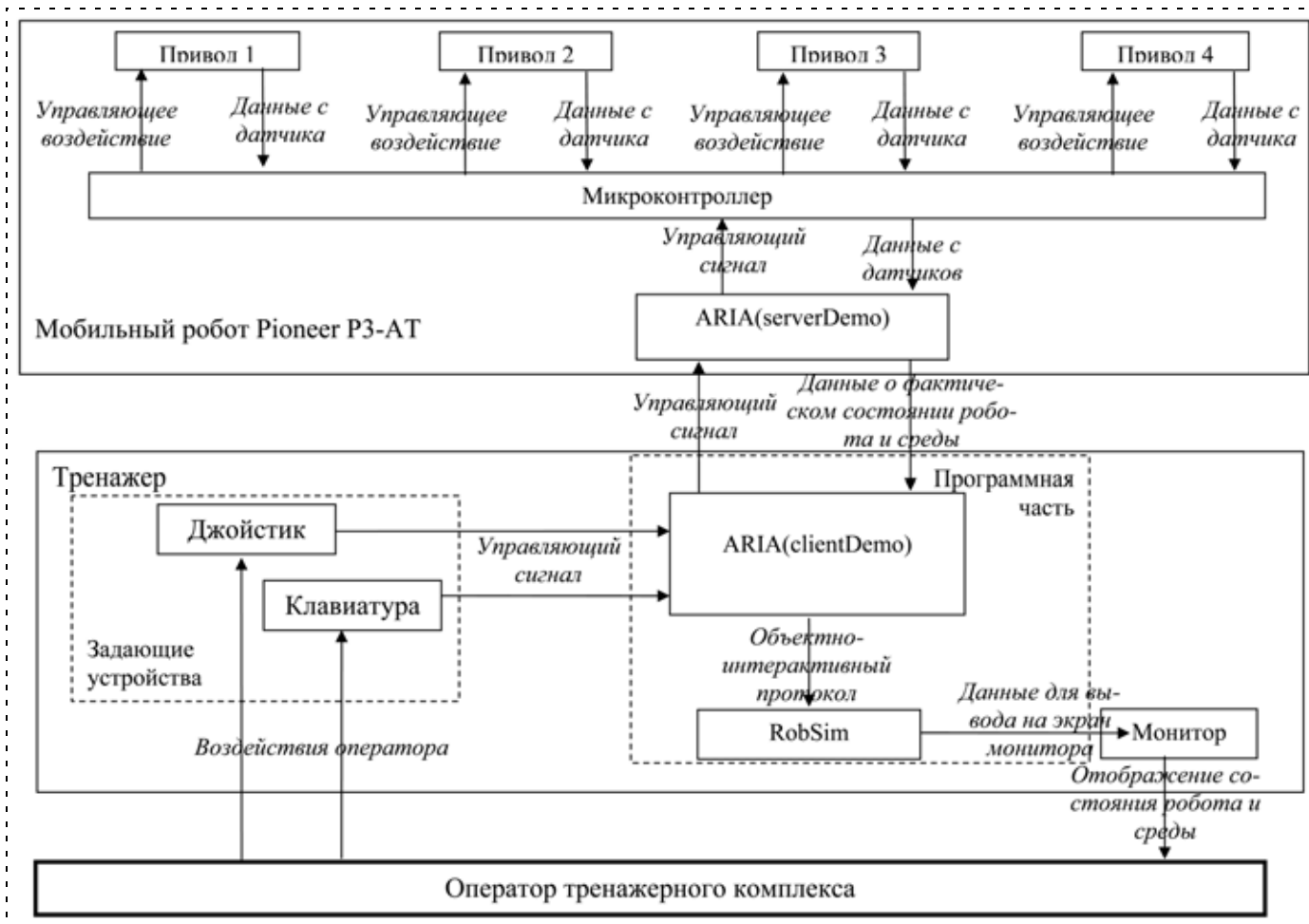


Рис. 4. Структурная схема тренажера

точной обработки. Также этой платформой осуществляется поддержка разнообразного внешнего оборудования [1].

Программная часть тренажера установлена на ЭВМ, которая имеет возможность организации беспроводного соединения с мобильным роботом.

#### **Программно-аппаратная часть тренажера.**

Создание тренажера проходило в три этапа:

- 1) создание компьютерной графической модели мобильного робота P3-AT для симуляции ее в программном комплексе RobSim;
- 2) разработка блока, позволяющего получать данные с датчиков обратной связи робота через приложение ARIA;
- 3) доработка пакета ARIA для реализации управления джойстиком и обеспечения взаимодействия между RobSim и ARIA.

#### *1. Создание трехмерной модели мобильного робота P3-AT*

Модели роботов и сцен в программном комплексе RobSim 4.0 создаются с помощью программного комплекса 3D Studio MAX. Для этого программного комплекса специально разработан Plug'in, который дает возможность назначения для объектов их математических моделей, а также воз-

можность экспорта этих моделей в специальном формате для последующей загрузки в RobSim [3].

Геометрическая модель мобильного робота была выполнена с помощью стандартных средств 3D Studio MAX, включая наложение текстур, которые были созданы преобразованием фотографий робота в редакторе изображений. Готовая геометрическая модель робота представлена на рис. 5.

Модель робота в пакете RobSim представляет собой совокупность объектов, связанных между собой, способную двигаться и обладающую собственной логикой поведения, подверженную воздействию гравитации и генерирующую собственную тень. Корневой объект конструкции обладает шестью степенями свободы. Модели роботов могут реагировать на нажатие и отпускание клавиш клавиатуры, а также обладать собственным интерфейсом панели управления.

Если конструкция включает в свой состав активные элементы (двигатели, колеса, сменный инструмент и т. п.), то для такой конструкции необходимо создание панели управления, с помощью которой будут вырабатываться команды для этих исполнительных механизмов робота.

Панель управления активной конструкции или робота состоит из двух основных частей: интер-

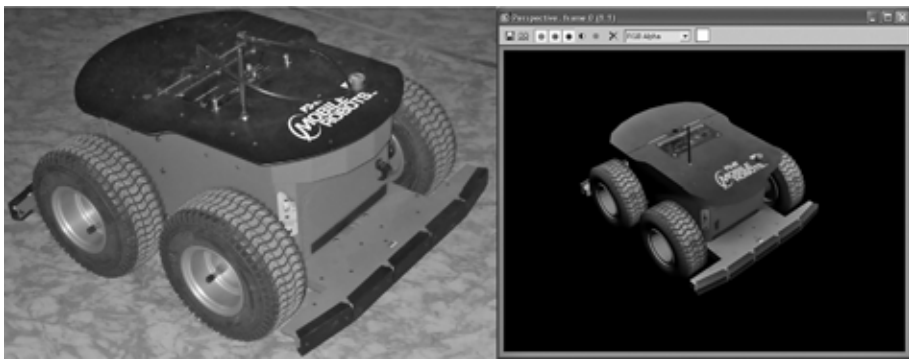


Рис. 5. Изображение мобильного робота P3-AT и его геометрическая модель

один Plug'in может содержать несколько блоков. Plug'in можно создавать на любой 32-битной версии среды разработки приложений.

Plug'in, описывающий создаваемые блоки, включает три класса объектов. Первый (PIPE) создает блок, реализующий интерфейс с программой, получающей данные от мобильного робота. На его выходе и входе находятся данные, предназначенные для обмена со следующими классами.

фейсной и алгоритмической. Интерфейсная часть представляет собой совокупность визуальных представлений всех органов управления, алгоритмическая часть — структурную схему системы управления, показывающую логическую связь между органами управления и исполнительными механизмами конструкции.

Для разработки панели управления был использован редактор, входящий в программный комплекс RobSim и ориентированный на совместное использование со средой 3D Studio MAX. В этом редакторе была построена такая структурная схема системы управления, которая обеспечивает преобразование выходных сигналов органов управления в сигналы, подаваемые на исполнительные механизмы робота. Общий вид окна редактора структурной схемы с указанием функций его элементов показан на рис. 6 (см. четвертую сторону обложки).

Эта схема включает в себя 12 блоков, каждый из которых выполняет свою функцию.

Блок PIPE отвечает за связь с программой, которая получает сигналы от реального робота. Этот блок имеет три выхода. По первому передается пакет данных, полученный от программы связи. Второй и третий служат для контроля поступаемых данных, они передают информацию о скорости вращения и скорости перемещения на соответствующие блоки, которые обеспечивают вывод информации на экран.

Блок P3-AT отвечает за преобразование пакетов данных, получаемых на входе, в управляющие воздействия на приводы трехмерной модели на выходе.

После экспорта в RobSim модель была готова к симуляции.

## 2. Создание блока для системы управления моделью робота P3-AT

В RobSim была реализована возможность разработки собственных блоков для системы управления. Эти блоки используются совместно со стандартными блоками из библиотеки блоков, однако позволяют разработчику описать логику их работы на языке высокого уровня. Каждый такой блок подключается как Plug'in в редактор панели управления и в основной программный модуль, причем

В первом классе реализуется связь с программой для получения данных. Это осуществляется с помощью именованного канала.

Именованные каналы (Named Pipes) — это объекты ядра, являющиеся средствами межпроцессной коммуникации между сервером канала и одним или несколькими клиентами канала. Сервером канала является процесс, создающий именованный канал [6]. Клиентом канала является процесс, подключающийся к созданному именованному каналу. От других аналогичных объектов именованные каналы отличает гарантированная доставка сообщений, возможность асинхронного ввода/вывода, возможность коммуникации между процессами на разных компьютерах в локальной вычислительной сети и относительная простота использования. По своему назначению они похожи на каналы операционной системы UNIX.

Второй класс является прототипом для реализации третьего (P3-AT), который осуществляет обработку данных и вывод управляющих воздействий приводам модели. Третий класс соответствует блоку "P3-AT" на структурной схеме системы управления. При сетевом взаимодействии он выполняется на машине-сервере. Разделение первого и третьего блоков требуется для того, чтобы блок P3-AT выполнялся синхронно со всей остальной системой управления робота, а блок PIPE — на локальной машине, к которой подключен интерфейс с клиентом.

## 3. Доработка программного пакета ARIA

Доработка программного пакета ARIA заключалась в реализации возможности для модуля клиента управления роботом с помощью стандартного джойстика и организации интерфейса с блоком системы управления моделью робота, который был описан выше. Эта задача была решена с помощью пакета Microsoft Visual Studio 2008.

ARIA — это открытая среда разработки программного обеспечения для мобильных роботов компании Mobile Robots. В ней собраны примеры программ, использующих различные возможности робота и взаимодействия с ним, такие как: управление движением, контроль информации с датчи-

ков, использование периферийных устройств, а также сетевое взаимодействие с удаленными компьютерами. Например, приложение demo служит для управления мобильным роботом с бортового компьютера. Через последовательное соединение это приложение связывается с микроконтроллером, передает данные для управления приводами робота и получает информацию от датчиков обратной связи. Также это приложение имеет возможность управления внешними устройствами.

В работе использовался пакет, способный не только обеспечивать связь с микроконтроллером, но и организовывать связь по беспроводному соединению с удаленным компьютером через сетевой протокол TCP/IP. Пакет состоит из двух приложений — clientDemo и serverDemo. Приложение clientDemo устанавливается на удаленный компьютер. Оно обрабатывает команды оператора, формирует пакет данных и отправляет их через сетевое соединение во второе приложение serverDemo, которое, в свою очередь, устанавливается на бортовом компьютере мобильного робота. Это приложение принимает, обрабатывает и передает данные на микроконтроллер, получает информацию с датчиков и отправляет их в clientDemo.

На первом этапе доработки приложения client-Demo была реализована возможность реагировать на события, которые вызывает джойстик, и обрабатывать их, не нарушая связи с клавиатурой. Для этого был усовершенствован модуль обработки событий, вызываемых клавиатурой — ArKeyHandler.

Вторым этапом доработки приложения было создание интерфейса связи с блоком управления моделью мобильного робота. Эта задача была решена применением именованного канала, принцип работы которого был приведен выше.

### **Экспериментальное исследование работы тренажера с элементами актуальной адаптации**

После разработки тренажера был проведен ряд опытов. Целью проведения этих экспериментов была проверка работоспособности всех его элементов, его возможностей, ограничений применения, поведения во внештатных ситуациях. Эксперименты проводились в лаборатории кафедры "Робототехника и мехатроника" МГТУ "СТАНКИН".

Суть экспериментов заключалась в наблюдении за тем, как компьютерная модель робота воспроизводит движение реального прототипа. Относительно реперных точек, расположенных в лаборатории и в компьютерной сцене, отслеживалась разница в перемещении компьютерной модели согласно данным с датчиков обратной связи робота и самого робота. На рис. 7, а, б (см. четвертую сторону обложки) изображен пример стартового положения объектов на-

блюдения, а на рис. 7, в, г, (см. четвертую сторону обложки) — их положение после совершения поворота.

В ходе проведенных экспериментов было установлено, что обеспечивается полное взаимодействие программных пакетов. Беспроводная связь, налаженная между мобильным роботом и удаленным компьютером, работает достаточно устойчиво. Робот четко реагирует на все задаваемые команды, а модель с необходимой точностью отрабатывает движение робота. Исходя из этого можно сделать вывод о верности подбора тех решений, которые были воплощены в данном тренажере и об их корректной реализации.

### **Заключение**

Был создан новый тип тренажера — тренажер с элементами актуальной адаптации. Помимо основных функций, присущих всем обучающим системам, созданный тренажер имеет возможность отладки поведения виртуальной модели с помощью реального робота. Это позволяет учесть индивидуальные особенности робота, его поведение в различных условиях и взаимодействие с объектами окружающей среды.

Следующим шагом может быть создание систем слежения за работой удаленных роботов. При достижении определенной точности отработки виртуальной моделью движения робота и при необходимой точности сцены, отражающей в симуляторе реальную среду работы мобильного робота, можно использовать эту систему вместо видеокамер или других средств передачи информации о ситуации в рабочей зоне робота. Такая система может обладать более широкими возможностями, так как просмотр может осуществляться с любой точки сцены под любым углом. Она может применяться для роботов, работающих постоянно в определенной среде, где использование других средств телеметрии не обосновано.

### **Список литературы**

1. **Pioneer 3** operations manual. MobileRobots Inc., 2007.
2. **Виртуальные** имитационно-тренажерные комплексы и системы визуализации / Под ред. В. Н. Решетникова // Сб. тр. Центра визуализации и спутниковых информационных технологий. Москва: Изд-во НИИ системных исследований РАН, 2007. 110 с.
3. **Руководство** для программистов: Robsim4 [Электронный ресурс]. Д. В. Евстигнеев, Москва, 2004.
4. **Сидоркин Н. А., Никитин В. Н.** Программно-информационные средства разработки компьютерных тренажеров для обучения операторов экстремальной робототехники (комплекс "RobSim-4") // Экстремальная робототехника. Нано- микро- и макророботы (ЭР-2009): Матер. XX Междунар. науч.-техн. конф. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. 390 с.
5. **Ющенко А. С.** Эргатические мехатронные системы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 3. С. 12—25.

**А. С. Заруднев**, канд. техн. наук, вед. аналитик,  
**Ю. В. Илюхин**, д-р техн. наук, проф.,  
 Московский государственный  
 технологический университет "СТАНКИН",  
 il\_yv178@mail.ru

## Повышение производительности лазерных комплексов на основе прогноза контурной ошибки

*Предложены метод построения и алгоритмы управления систем реализации движений рабочих органов высокопроизводительных лазерных комплексов, основанные на мехатронном подходе и зависимостях, позволяющих прогнозировать значения контурной ошибки и выбирать рациональные значения контурной скорости с учетом технологических ограничений.*

**Ключевые слова:** лазерная резка, лазерные комплексы, производительность, контурная точность, мехатроника

### Постановка задачи повышения производительности лазерных комплексов

На промышленных предприятиях малого и среднего бизнеса широко применяются компактные и относительно недорогие технологические комплексы лазерной резки. Они реализуют движение рабочего органа (РО) (лазерной головки) по двум или трем координатам, содержат устройства управления на базе персональных компьютеров либо промышленных контроллеров, комплектные цифровые исполнительные следящие приводы с бесконтактными двигателями постоянного тока и координатные столы, как правило, оснащенные механическими передачами на базе зубчатых ремней, обладающих заметной упругой податливостью.

Одним из наиболее важных требований, предъявляемых к таким лазерным комплексам, является требование достижения максимально возможной производительности при обеспечении необходимой высокой точности реализуемого движения РО по желаемым траекториям. В качестве критерия производительности рассматривается время  $T$  выполнения всей программы движения рабочего органа лазерного комплекса, причем должно выполняться условие

$$T \rightarrow T_{\min}, \quad (1)$$

где  $T_{\min}$  — минимальное достижимое время лазерной обработки. Приведенное условие рассматривается при соблюдении технологических ограничений, наложенных на скорость  $V$  и ускорение  $a$  движения РО по желаемой траектории:

$$V \leq V_{\max}; \quad a \leq a_{\max}, \quad (2)$$

и требований к точности его движений по желаемой траектории

$$\delta_T \leq \delta_{T, \text{доп}}, \quad (3)$$

где  $V_{\max}$ ,  $a_{\max}$  — максимальные допустимые значения контурной скорости и ускорения движения РО, обусловленные мощностью лазера, свойствами материала обрабатываемого изделия, необходимостью снижения перегрузок, действующих на оптику рабочего органа, и возможностями исполнительных приводов;  $\delta_T$ ,  $\delta_{T, \text{доп}}$  — абсолютные значения фактической и допустимой контурных ошибок, которые представляют собой отклонения реализованной траектории движения рабочего органа от желаемой траектории его движения. Очевидно, что для повышения производительности скорость  $V$  и ускорение  $a$  движения РО на каждом сегменте траектории должны быть как можно ближе к их предельным значениям  $V_{\max}$  и  $a_{\max}$ . Однако рост этих величин вызывает увеличение контурной ошибки и ограничивается необходимостью выполнения требования (3). Особенно остро проблема повышения производительности стоит для систем, в которых РО движется по сложной траектории, состоящей из большого числа сегментов.

Особенность рассматриваемой проблемы состоит в том, что существует зависимость контурной ошибки от динамических свойств исполнительных следящих приводов и механических подсистем, характеристик желаемой траектории и выбранного закона движения РО по этой траектории, влияющего на формирование задающих воздействий. Выявление и применение этой зависимости позволяет более полно использовать возможности технологического оборудования и достичь высокой эффективности лазерного комплекса, рассматривая систему управления движением РО с позиций мехатроники [1, 2]. Предлагаемый путь достижения высокой производительности лазерной системы при обеспечении гарантированной точности движения РО предполагает согласованное совершенствование исполнительных систем и разработку алгоритмов компьютерного управления на основании характерного для мехатроники системного подхода с учетом модели, позволяющей прогнозировать контурную ошибку. Существенно, что эта модель должна быть справедлива не только для установившихся, но и для переходных процессов, возникающих в окрестностях точек сопряжения сегментов желаемой траектории.

### Зависимость контурной ошибки от характеристик желаемой траектории, параметров движения рабочего органа и динамических свойств исполнительных систем

Для достижения минимального возможного значения максимальной контурной ошибки  $\delta_{T, \max}$  в установившемся режиме обработки прямых и дугообразных участков траектории необходимо, прежде всего, соответствующим образом настроить исполнительные следящие системы. В [3] показано, что  $\delta_{T, \max}$  зависит от частот среза разомкнутых следящих приводов и частот собственных колеба-

ний механических частей комплекса. Следует отметить, что для разных степеней подвижности координатного стола и при разных положениях рабочего органа имеют место различные значения частот собственных колебаний механических частей. Для выполнения условия (3) предлагается рассматривать неравенство  $\delta_T \max \leq \delta_{T, \text{доп}}$  и выбирать частоты среза  $\omega_{c, \text{п}}$  всех следящих приводов одинаковыми в соответствии с уравнением

$$\omega_{c, \text{п}} = \frac{\omega_{o, \text{min}} \omega_{o, \text{max}}}{\sqrt{\omega_{o, \text{min}}^2 + \omega_{o, \text{max}}^2}}, \quad (4)$$

где  $\omega_{o, \text{min}}$  и  $\omega_{o, \text{max}}$  — минимальное и максимальное значения частот собственных колебаний механических подсистем рассматриваемого лазерного комплекса. Для установившегося движения и при использовании системы приводов, работающих в декартовой системе координат и не обладающих компенсирующими связями по задающим воздействиям, предлагается оценивать контурную ошибку  $\delta_T$  по формуле

$$\delta_T \leq \delta_{T \text{ max}} = V^2 R^{-1} \max_i \left\{ \left| \frac{1}{2\omega_{c, \text{п}}^2} - \frac{1}{\omega_{oi}^2} \right| \right\}, \quad (5)$$

где  $V$  — контурная скорость;  $R$  — радиус дугообразного участка траектории;  $\omega_{oi}$  — частота собственных колебаний  $i$ -й механической подсистемы ( $i = 1, 2$ ).

Такой выбор дает возможность увеличить скорость движения при сохранении требуемой точности. Но при движении по траекториям, содержащим большое число узлов сопряжения отдельных сегментов, представленных в [3] данных о зависимости траекторной ошибки от параметров исполнительных систем в установившемся режиме движения оказывается недостаточно. Необходимы дополнительные сведения о траекторной ошибке, возникающей в динамике при проходе рабочего органа через узлы траектории. Для обеспечения необходимой точности движения традиционные алгоритмы управления движением рабочего органа, реализованные в большинстве промышленных систем управления лазерных комплексов, предусматривают снижение контурной скорости движения в узловых точках траектории до нуля. При этом, как показывает опыт эксплуатации подобных систем, общее время выполнения технологической операции лазерной резки может оказаться весьма значительным именно из-за описанного снижения контурной скорости.

Для дальнейшего повышения производительности предлагается формировать закон управления движением с учетом выявленной зависимости допустимой контурной скорости движения рабочего органа в узлах траектории от допустимой контурной погрешности, геометрических особенностей желаемой траектории и динамических свойств ис-

полнительных приводов и механических частей технологического комплекса. Искомая зависимость определена в результате проведенных с помощью ЭВМ вычислительных экспериментов с математической моделью движения РО лазерной системы.

Математическая модель содержит описание формирователя задающих воздействий на следящие приводы, математическое описание комплекса исполнительных следящих систем и блок вычисления траекторной ошибки. На основании данных о запрограммированной траектории движения РО формирователь решает обратную задачу кинематики и создает задающие воздействия, несущие информацию о желаемых перемещениях по координатным осям системы. При этом реализуется трапецеидальный характер изменения желаемой контурной скорости и ее непрерывность в узлах, объединяющих сопряженные сегменты. Принципиальной особенностью является то, что желаемая контурная скорость в узле может быть отлична от нуля. Для описания исполнительных частей комплекса использована линеаризованная редуцированная модель. Исследование показало, что в результате большой динамической жесткости замкнутых приводов моменты реакции механических частей слабо влияют на движение валов двигателей, и влиянием этих реакций можно пренебречь. Поэтому использованная при вычислительных экспериментах модель [4] характеризуется передаточными функциями

$$W_i(s) = \frac{1}{T_i s + 1} \cdot \frac{1}{\tau_i^2 s^2 + 2\xi_i \tau_i s + 1}, \quad (6)$$

где  $i$  — номер канала управления системы и соответствующего ему следящего привода ( $i = 1; 2$ );  $T_i$  — постоянная времени аperiodического звена, характеризующего свойства  $i$ -го замкнутого следящего привода;  $\tau_i$  и  $\xi_i$  — постоянная времени и коэффициент относительного демпфирования  $i$ -й механической подсистемы. Постоянная времени  $\tau_i$  принята равной величине, обратной частоте собственных колебаний  $\omega_{oi}$   $i$ -й механической подсистемы. Постоянную времени  $T_i$  с достаточной для практики точностью можно оценить по формуле  $T_i = \omega_{c, \text{п}}^{-1}$ , если выполнить настройку контуров регулирования тока и скорости в соответствии с рекомендациями [3].

В результате исследования установлено, что доминирующими факторами, влияющими на точность движения в узлах траектории, являются контурная скорость  $V$ , угол  $\alpha$  сопряжения сегментов траектории и динамические свойства исполнительных систем, характеризуемые частотой среза  $\omega_c$  разомкнутых следящих приводов, частотами собственных колебаний  $\omega_{o1}, \dots, \omega_{oN}$  и коэффициентами относительного демпфирования  $\xi_1, \dots, \xi_N$  механических подсистем, обладающих упругостью.

В результате проведенных исследований установлено, что траекторная ошибка пропорциональна контурной скорости в узле траектории. Максимальное значение относительной траекторной ошибки  $\bar{\delta}_T = \delta_T V^{-1}$  пропорционально абсолютному значению синуса угла  $\alpha$  между сопряженными сегментами при  $0 \leq |\alpha| \leq 0,5\pi$ . При  $\pi > |\alpha| > 0,5\pi$  контурная ошибка незначительно отличается от ее значения при  $\alpha = 0,5\pi$ . На основании всей совокупности полученных результатов моделирования определена эмпирическая формула, предлагаемая для оценки относительной траекторной ошибки в узлах траектории:

$$\bar{\delta}_T \max = f_1(\alpha) \{ |\xi_{\omega \min} - 0,25| + 0,25 \} f_2(\omega_{\min}, \omega_{\max}), \quad (7)$$

где

$$f_1(\alpha) = \begin{cases} |\sin \alpha| & \text{при } 0 < |\alpha| < 0,5\pi; \\ 1 & \text{при } \pi > |\alpha| > 0,5\pi; \end{cases} \quad (8)$$

$\xi_{\omega \min}$  — значение коэффициента относительного демпфирования механической части с наименьшей частотой собственных колебаний;  $f_2(\omega_{\min}, \omega_{\max})$  — функция, характеризующая влияние динамических свойств исполнительных систем:

$$f_2(\omega_{\min}, \omega_{\max}) = 1,5 \left| \frac{1}{\omega_{\min}} - \frac{1}{\omega_{\max}} \right| + \frac{1}{2\omega_{\text{с.п}}}, \quad (9)$$

причем частота среза разомкнутых приводов определяется по формуле (4).

Сравнение результатов компьютерного моделирования и расчетов по предложенным формулам (6)—(8) свидетельствует о том, что найденные эмпирические зависимости обладают приемлемой точностью. Наибольшая погрешность определения максимальной относительной контурной ошибки не превышает 26 %.

### Оценка максимального ускорения рабочего органа

Исследование показало, что характер зависимости наибольшего ускорения, сообщаемого РО, в окрестности узла траектории  $a_{y \max}$  от динамических и программных параметров движения аналогичен  $\delta_T \max$ . Максимальное относительное ускорение  $\bar{a}_{y \max} = a_{y \max} V^{-1}$  зависит от контурной скорости  $V$ , угла  $\alpha$  сопряжения сегментов траектории и динамических свойств исполнительных систем. Предлагается оценивать его по формуле

$$\bar{a}_{y \max} = f_3(\alpha) e^{1 - \xi_{\omega \max}} f_4(\omega_{\min}, \omega_{\max}), \quad (10)$$

где

$$f_3(\alpha) = \begin{cases} |\sin \alpha| & \text{при } 0 < |\alpha| < 0,5\pi; \\ 2 - |\sin \alpha| & \text{при } \pi > |\alpha| > 0,5\pi; \end{cases} \quad (11)$$

$\xi_{\omega \max}$  — значение коэффициента относительного демпфирования механической части с наибольшей частотой собственных колебаний;  $f_4(\omega_{\min}, \omega_{\max})$  —

функция, характеризующая влияние динамических свойств исполнительных систем:

$$f_4(\omega_{\min}, \omega_{\max}) = \omega_{\text{с.п}} \sqrt{\frac{\omega_{\min} + \omega_{\max}}{2\pi^2 \omega_{\max}}}, \quad (12)$$

причем  $\omega_{\text{с.п}}$  выбирается в соответствии с формулой (4). Наибольшая погрешность определения максимального относительного ускорения по предложенным формулам невелика и при  $\frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} \leq 2$  не превышает 24 %.

Формулы (5), (7)—(12) позволяют с достаточной для практики точностью оценить максимальные значения контурной ошибки и ускорения РО и рекомендуются для построения алгоритмов выбора закона изменения контурной скорости на сегментах и в узле желаемой траектории.

### Повышение производительности при обеспечении заданной точности и соблюдении технологических ограничений

Повышение производительности достигается в результате максимально быстрого движения РО по сегментам желаемой траектории и через ее узлы при соблюдении требований к точности, ускорению и отсутствию разрывов контурной скорости в узлах. Выбор максимально возможных значений контурной скорости для каждого сегмента и узла желаемой траектории проводится с помощью разработанного алгоритма оптимизации значений параметров закона движения, определяющего желаемый путь  $L_k(t)$ , который должен пройти РО вдоль  $k$ -го сегмента желаемой траектории в функции от времени  $t$  движения по этому сегменту:

$$L_k(t) = \begin{cases} V_{\text{нач}} t + \frac{a_k t^2}{2} & \text{при } 0 < t \leq t_p; \\ V_{\text{нач}} t_p + \frac{a_k t_p^2}{2} + V_{\text{ном}} t & \text{при } t_p < t \leq t_p + t_{\text{п}}; \\ V_{\text{нач}} t_p + \frac{a_k t_p^2}{2} + V_{\text{ном}} t_{\text{п}} - \frac{a_k t^2}{2} & \text{при } t_p + t_{\text{п}} < t \leq t_p + t_{\text{п}} + t_{\text{т}}, \end{cases}$$

где  $V_{\text{нач}}$  и  $V_{\text{ном}}$  — контурная скорость в начале сегмента траектории и номинальная контурная скорость соответственно;  $a_k$  — ускорение вдоль траектории;  $t_p$ ,  $t_{\text{т}}$ ,  $t_{\text{п}}$  — времена разгона, торможения и движения с постоянной скоростью соответственно, которые вычисляются в соответствии с уравнениями

$$t_p = \frac{V_{\text{ном}} - V_{\text{нач}}}{a_k};$$

$$t_{\text{п}} = \frac{L_{\text{сег}} - \left( V_{\text{нач}} t_p + \frac{a_k t_p^2}{2} \right) - \left( V_{\text{ном}} t_{\text{т}} + \frac{a_k t_{\text{т}}^2}{2} \right)}{V_{\text{ном}}};$$

$$t_T = \frac{V_{\text{НОМ}} - V_{\text{КОН}}}{a_k}$$

Здесь  $V_{\text{КОН}}$  — контурная скорость в конце сегмента траектории;  $L_{\text{сег}}$  — длина сегмента траектории. Путь  $L_k(t)$  является аргументом при определении желаемых координат рабочего органа, которые вычисляются с учетом типа и значений параметров каждого сегмента траектории.

Алгоритм определения оптимальных значений параметров закона управления движением РО (рис. 1) базируется на выявленных взаимосвязях точности исполнительных движений с геометрическими характеристиками траекторий, контурной скоростью движения и динамическими свойствами исполнительных систем. С их помощью осуществляется прогнозирование контурной ошибки и выбираются значения параметров закона управления. В результате анализа исходных данных о желаемой траектории этот алгоритм обеспечивает определение предельной контурной скорости на сегментах в виде отрезков прямых или дуг окружностей, а также в узлах траектории и максимальной допустимой скорости, реализуемой в узлах при разгоне и торможении.

Предложено выбирать значения желаемой контурной скорости в узле  $V_y$  и на сегменте  $V_c$  в соответствии с правилами

$$V_y = \min(V_{y.\text{тех}}, V_{y.\text{точ}}, V_{y.\text{р}}), \\ V_c = \min(V_{c.\text{тех}}, V_{c.\text{точ}}, V_{c.\text{р}}),$$

где  $V_{y.\text{тех}}$ ,  $V_{y.\text{точ}}$ ,  $V_{y.\text{р}}$ ;  $V_{c.\text{тех}}$ ,  $V_{c.\text{точ}}$ ,  $V_{c.\text{р}}$  — максимально допустимые контурные скорости, обусловленные технологическими ограничениями, требованиями к контурной точности и длине сегмента в сочетании с контурным ускорением в узлах и на сегментах траектории соответственно. Значения  $V_{c.\text{тех}}$  и  $V_{y.\text{тех}}$  должны быть равны и назначаются технологом. На основании (5) желаемая скорость  $V_{c.\text{точ}}$  вычисляется по формуле

$$V_{c.\text{точ}} = \sqrt{\frac{R\delta_{\text{т.доп}}}{\max_i \left\{ \left| \frac{1}{2\omega_c^2} - \frac{1}{\omega_{\delta i}^2} \right| \right\}}}$$

Желаемая скорость  $V_{y.\text{точ}}$  с учетом ограничения на предельное ускорение  $a_{y.\text{мах}}$  определяется по

формуле  $V_{y.\text{точ}} = \min\left(\frac{\delta_{\text{т.доп}}}{\delta_{\text{т.мах}}}, \frac{a_{y.\text{доп}}}{a_{y.\text{мах}}}\right)$ , где  $\delta_{\text{т.мах}}$  —

максимальная относительная контурная погрешность в окрестности узла траектории, полученная с помощью зависимости (7);  $a_{y.\text{мах}}$  — максимальное относительное ускорение в окрестности данного узла, полученное с помощью зависимости (10). Значения  $V_{y.\text{р}}$  и  $V_{c.\text{р}}$  определяются на основании известных значений  $a_k$ ,  $V_{c.\text{тех}}$  и  $V_{y.\text{тех}}$ , по-

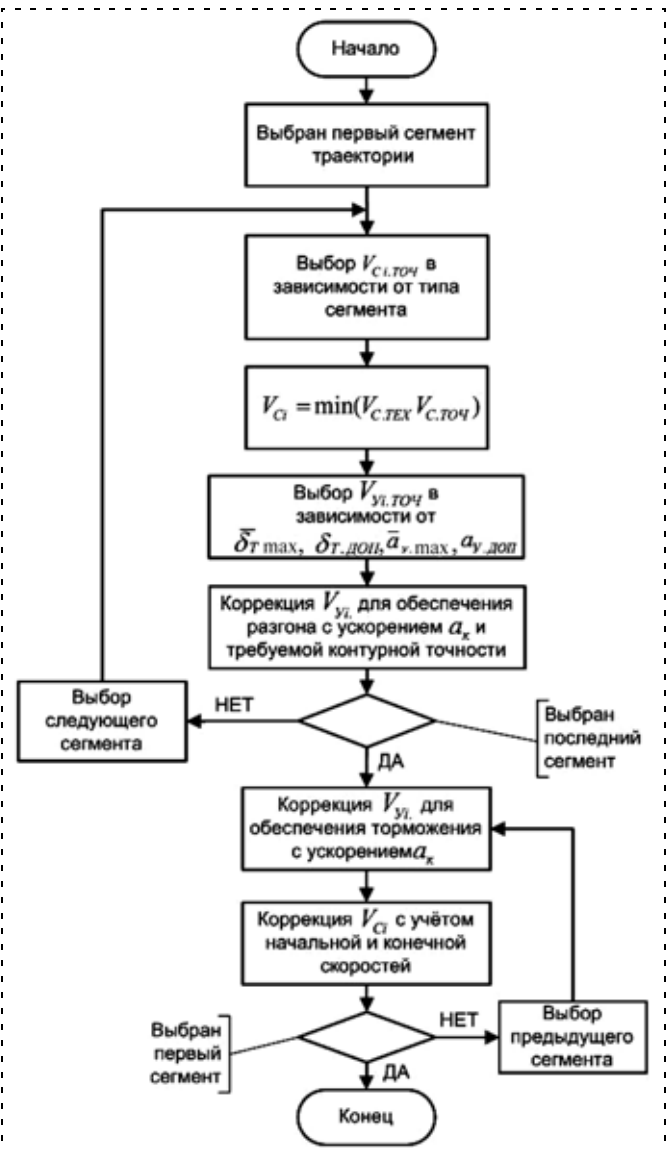


Рис. 1. Алгоритм выбора значений параметров закона изменения скорости движения рабочего органа

лученных значений  $V_{c.\text{точ}}$  и  $V_{y.\text{точ}}$  для каждого узла и сегмента траектории и длин сегментов для обеспечения разгона и торможения с допустимым контурным ускорением.

Существенно, что применение разработанного метода дает возможность реализовать автоматизированное формирование управляющей программы для лазерного комплекса, обеспечивающей повышение его производительности.

### Реализация системы управления и экспериментальное исследование точности и производительности лазерного комплекса

Экспериментальная проверка результатов исследования выполнена с использованием разработанной авторами системы управления мехатронным лазерным комплексом, включающим в себя координатный стол с перемещениями  $3400 \times 2000$  мм, цифровые исполнительные следящие приводы на

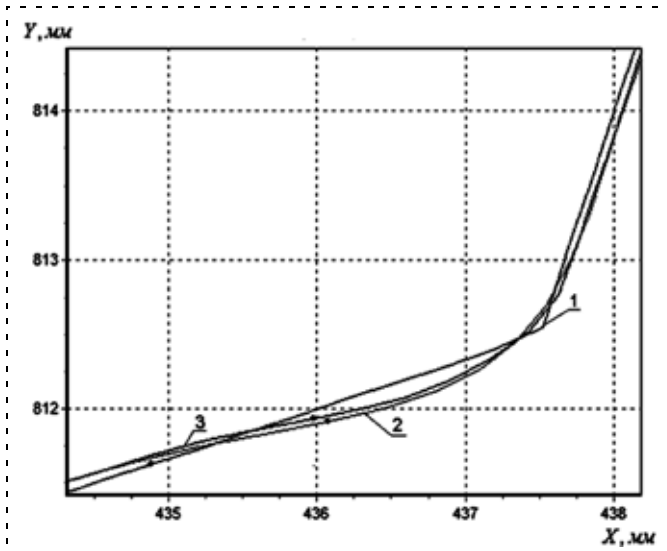


Рис. 2. Желаемая траектория движения рабочего органа (1), траектория, полученная путем моделирования (2) и фактическая траектория (3), зафиксированная в эксперименте

базе синхронных двигателей и преобразователей фирмы КЕВ и устройства управления на основе промышленного персонального компьютера с дополнительными периферийными устройствами. Комплекс имеет механические передачи в виде последовательно соединенных планетарных редукторов и зубчато-ременных передач. Система оснащена разработанной программой управления, которая обеспечивает взаимодействие с пользователем, преобразует информацию о желаемой траектории и технологические данные в коды управления исполнительными приводами, лазером и вспомогательным оборудованием комплекса. При этом реализуется предложенный закон движения рабочего органа, минимизирующий затраты времени на обработку за счет оптимизации профиля контурной скорости. Центральным в этой программе является блок оптимизации параметров закона движения. Программа управления функционирует в режиме жесткого реального времени и выдает управляющие воздействия на приводы с периодом квантования 3 мс.

Исследование контурной погрешности свидетельствует о сходстве результатов, полученных экспериментально и путем моделирования (рис. 2).

Экспериментальное исследование производительности системы, выполненное совместно с

компанией "Лантан-Лазер", свидетельствует о высокой эффективности предложенных алгоритмов управления. В частности, при выполнении управляющей программы лазерной резки с общей длиной реза более 32 м выигрыш производительности предлагаемой системы по сравнению с системой-прототипом, реализующей традиционный способ управления, составил около 30 % при контурной ошибке не более 100 мкм.

### Основные результаты исследования и рекомендации

Выявленные зависимости и разработанные на их основе алгоритмы управления позволяют повысить производительность лазерных комплексов при соблюдении требований к точности и с учетом технологических ограничений. Полученная модель прогнозирования контурной ошибки в зависимости от контурной скорости, геометрических характеристик желаемой траектории и динамических свойств исполнительных систем представляет собой основу для оптимизации закона изменения контурной скорости движения рабочего органа по желаемой траектории. При применении предлагаемых решений наибольший выигрыш в производительности и общей эффективности может быть достигнут в случае создания и модернизации систем управления движением лазерных комплексов, оснащенных упругими механическими компонентами, предназначенных для лазерной резки деталей сложной формы и ориентированных на применение на предприятиях малого и среднего бизнеса. Разработанные модели и алгоритмы управления могут быть полезны и для ряда других технологических машин.

### Список литературы

1. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение. М.: Машиностроение, 2007. 255 с.
2. Илюхин Ю. В. Синергетический (мехатронный) подход к проектированию систем управления технологических роботов // Мехатроника. 2000. № 2. С. 7–12.
3. Илюхин Ю. В. Реализация мехатронного подхода при построении систем компьютерного управления комплексов лазерной и плазменной резки // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 10. С. 45–50.
4. Заруднев А. С., Илюхин Ю. В. Анализ точности движений лазерного комплекса // Сб. докл. IX-й науч. конф. по тематическому моделированию и информатике. М.: Изд. МГТУ "Станкин" — ИММ РАН, 2006. С. 196–199.



**И. И. Дунин-Барковский**, канд. техн. наук, доц.,  
**Ю. В. Подураев**, д-р техн. наук, проф.,  
 Московский государственный  
 технологический университет СТАНКИН,  
 poduraev@mail.ru

## Современные оптомехатронные системы для трехмерного оптического контроля объектов

*Рассматривается применение прецизионных и высокоскоростных мехатронных систем для трехмерного оптического контроля в современных технологиях электронного производства. Рассмотрены особенности мехатронных систем оптического контроля, их структура, требования, предъявляемые к системам контроля и к их электромеханическим подсистемам. Приведены примеры применения оптомехатронных систем в современных технологиях сборки печатных плат методом монтажа на поверхности, изготовления керамических многослойных структур, изготовления интегральных схем методом "перевернутого кристалла".*

**Ключевые слова:** оптомехатронные системы, автоматические оптические системы контроля, активные системы технического зрения

### Введение

Автоматические оптические системы контроля (Automated Optical Inspection systems) являются неотъемлемой частью современного производства, так как в большинстве случаев только они позволяют обеспечить полный контроль изделий в процессе производства, причем многократно и на разных его стадиях. Развитие современных систем данного класса основано на принципах и методах мехатроники.

В новых технологиях электронного производства к оптомехатронным системам контроля предъявляются следующие ключевые требования:

- необходимость обеспечения полного контроля поверхности объекта (печатной платы, подложки и т. п.) путем сканирования значительных площадей;
- высокая разрешающая способность системы по всем трем осям, вызванная малыми размерами контролируемых объектов, составляющая обычно десятки — сотни микронетров;
- возможность проведения контроля объекта в реальном масштабе времени, т. е. за время, не превышающее время цикла

автоматической производственной линии (обычно от 10 до 100 с);

- высокая скорость сканирования объекта;
- высокая скорость обработки информации;
- возможность ввода и хранения очень большого объема информации, размер обрабатываемых изображений составляет единицы — десятки гигапикселей.

### Структура активных систем технического зрения

Основой оптомехатронной системы трехмерного контроля, как правило, является активная система технического зрения [1]. Структура активной системы технического зрения (СТЗ) отличается от традиционных СТЗ включением мехатронных модулей для реализации дополнительных функций, например, для осуществления сканирования, управления освещением и т. д.

Структура активной СТЗ содержит следующие основные составные части (рис. 1):

- один или несколько приемников изображения, предназначенных для получения изображений объектов;
- систему освещения, состоящую из источников света, который отражается от объектов и воспринимается приемниками изображения;
- оптическую систему или системы, состоящие из набора оптических компонентов, предназначенные для фокусировки излучения источников света на объектах, а также фокусировки отраженного объектами света на сенсорных элементах приемников изображения;
- системы перемещения, предназначенные для перемещения приемников изображения, осветителей или объектов в целях обеспечения получения изображений при требуемом их относительном положении;

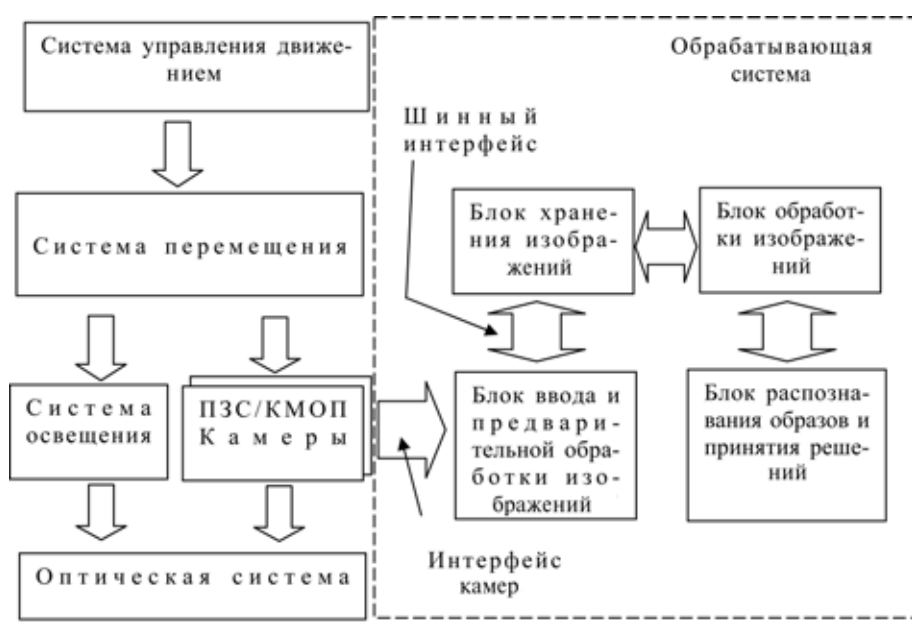


Рис. 1. Структура активной СТЗ

- блок ввода изображений для преобразования данных изображения из формата приемника в формат хранения и обработки (для приемников изображения с аналоговым выходом), который также служит для перевода изображения в цифровую форму;
- блок хранения изображений, чаще всего является частью оперативной памяти компьютера, но может представлять собой и отдельное запоминающее устройство;
- систему обработки изображений, предназначенную для реализации методов и алгоритмов обработки полученных изображений;
- систему распознавания образов и принятия решений.

Для получения изображений используется набор приемников изображения, которые в зависимости от типа системы представляют собой телевизионные камеры на основе матричных или линейных сенсоров на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС, ССД) или комплиментарных сенсоров металл—окисел—полупроводник (КМОП, CMOS). В оптомехатронных системах часто используется возможность перемещения одного или нескольких приемников изображения в пространстве, либо различные элементы системы (приемники изображения или источники освещения) расположены на определенном расстоянии или под определенным углом по отношению друг к другу. Примером этого могут служить бинокулярные системы технического зрения или 3D-системы, принцип действия которых основывается на триангуляционных методах.

### Требования к электромеханическим подсистемам

К электромеханической подсистеме оптомехатронного контроля [2] предъявляются следующие главные требования:

- значительная скорость перемещения — в диапазонах 30...300 мм/с для процесса сканирования и до 1000 мм/с при позиционировании;
- высокая стабильность скорости перемещения, позволяющая сканировать со скоростью, соответствующей максимальной частоте камеры;
- высокая точность траектории движения, обеспечивающая, в частности, возможность сканирования в двух направлениях с полным наложением изображений;
- высокая точность синхронизации камеры.

Этим требованиям отвечают современные мехатронные модули линейного перемещения, построенные на основе линейных двигателей.

### Системы активного контроля с обычным разрешением

К системам данного вида относятся системы с разрешением в плоскости поверхности объекта 15...20 мкм, которые наиболее широко применяются для автоматического контроля толщины припоя при производстве печатных плат либо контро-



Рис. 2. Оптомехатронная система контроля с обычным разрешением



Рис. 3. Структура системы с обычным разрешением

лю для правильности установки электронных компонентов на печатную плату. Мехатронная система для контроля высоты припоя в автоматической линии сборки печатных плат по технологии монтажа на поверхности (SMT) показана на рис. 2

Структура системы с обычным разрешением показана на рис. 3. Система состоит из следующих основных устройств: измерительной головки, мехатронных модулей линейного перемещения по осям  $X$  и  $Y$ , входного конвейера, основного конвейера, выходного конвейера, системы управления. Система предназначена для контроля объектов, обладающих значительной площадью поверхности, в реальном масштабе времени в режиме сканирования. Рабочее сканирование поверхности печатной платы осуществляется при движении модуля по оси  $X$ , которая расположена перпендикулярно к линейкам сенсоров приемника изображения в измерительной головке. Модуль оси  $Y$  предназначен для перемещения полосы сканирования в направлении, перпендикулярном направлению рабочего сканирования (рис. 4).

Сканирование проводится в двух направлениях в связи с одновременным использованием двух проекторов, входящих в состав измерительной головки, структура которой показана на рис. 5. Свет от металлогалогенового источника света проходит

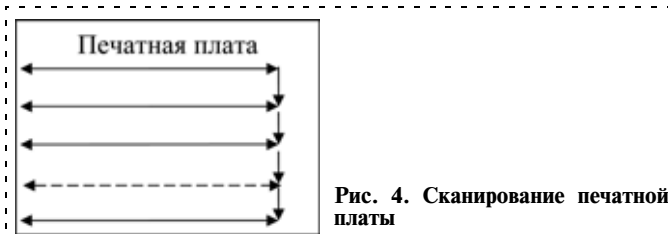


Рис. 4. Сканирование печатной платы

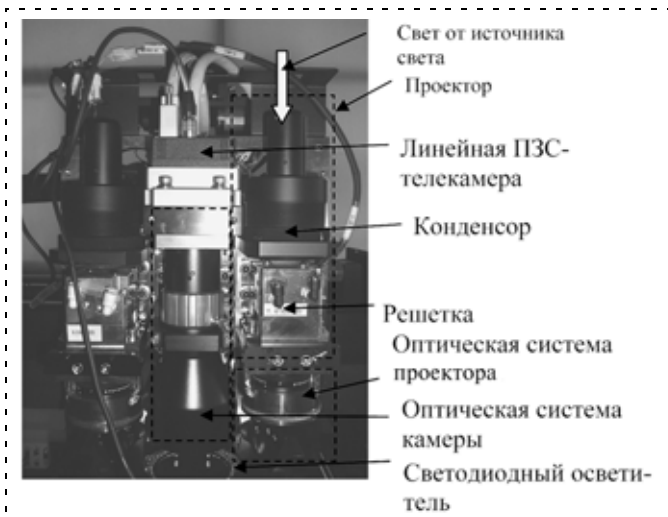


Рис. 5. Измерительная головка

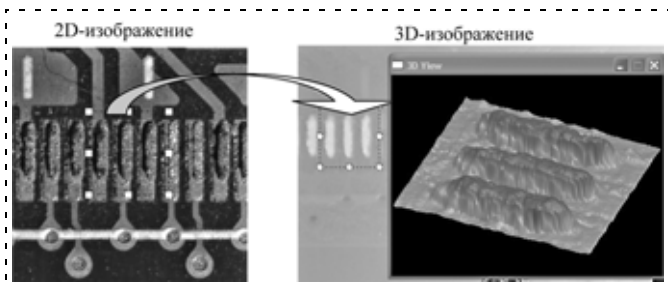


Рис. 6. Бугорки пасты припоя на печатной плате

через линзу-конденсор, решетку и оптическую систему проекторов и приобретает синусоидальное распределение яркости, позволяющее использовать метод фазового сдвига для определения высоты профиля объекта контроля (печатной платы). Отраженный от поверхности платы свет формирует изображение на трех ПЗС-линейках телекамеры, наличие которых необходимо для вычисления сдвига фазы [1, 3, 7]. Телецентрический объектив камеры обеспечивает отсутствие сдвига изображения на плоскости даже при наличии искривлений поверхности печатной платы. Двойное сканирование с использованием проекторов с немного отличающимся периодом решетки позволяет измерять высоту в значительно более широком диапазоне (6 мм), а также избежать наличия областей тени, в которых данные о высоте отсутствуют.

Изображения бугорков припоя для установки корпуса типа QFP на печатной плате, полученные с помощью этой системы, представлены на рис. 6. При этом получают как трехмерные изображения, так и обычные двумерные изображения.

Контролируемыми параметрами в данном случае являются:

- средняя высота бугорка припоя;
- отклонения по положению в плоскости печатной платы ( $X$ ,  $Y$ );
- площадь бугорка припоя;
- объем бугорка припоя;
- отклонения формы бугорка припоя.

Основные характеристики системы обычного разрешения приведены ниже.

Разрешение по осям $X$ , $Y$ , мкм. . . . .	20
Разрешение по оси $Z$ , мкм. . . . .	0,2
Формат ПЗС-камеры. . . . .	2096 × 3
Скорость сканирования в точном режиме, мм/с . . . . .	150
Скорость сканирования в скоростном режиме, мм/с . . . . .	300
Период фазы по оси $Z$ , мкм . . . . .	650
Калибровочный рабочий диапазон по оси $Z$ , мм . . . . .	6

Для определения точного положения платы на конвейере используется дополнительное сканирование отдельных областей платы с использованием светодиодной подсветки.

### Системы высокого разрешения

Многие современные технологии предъявляют существенно более высокие требования по разрешающей способности к мехатронной системе автоматического контроля, которым не соответствуют параметры системы с обычным разрешением. Это, например, такие перспективные технологии электронного производства, как изготовление керамических многослойных структур и технология производства интегральных схем методом "перевернутого кристалла" (flip chip, FC). Размеры контролируемых объектов в этих технологиях составляют 50...70 мкм. Следовательно, разрешающая способность в плоскости объектов должна быть увеличена и должна составлять 5...7 мкм, так как для надежного измерения контролируемых параметров на каждое из измерений объекта должно приходиться по крайней мере по несколько точек.

Структура системы высокого разрешения показана на рис. 7.

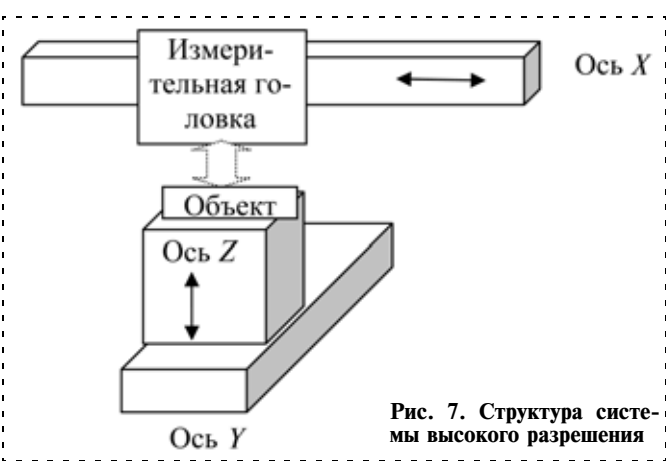


Рис. 7. Структура системы высокого разрешения



Рис. 8. Оптомехатронная система высокого разрешения

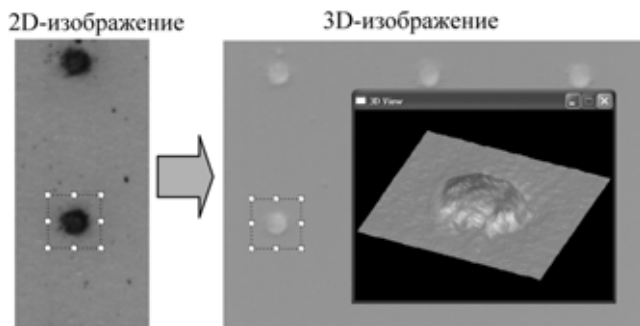


Рис. 9. Изображения заполненного отверстия в керамической плате

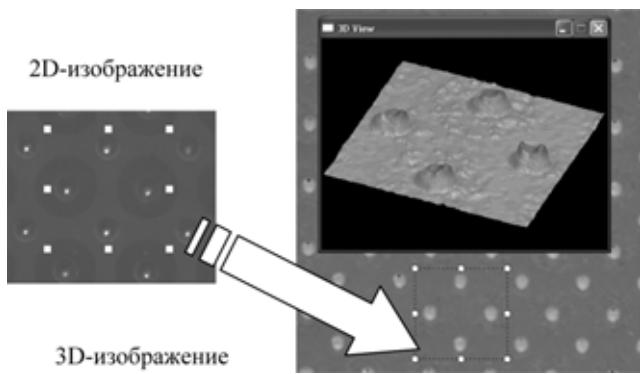


Рис. 10. Изображения бугорков припоя FPGA

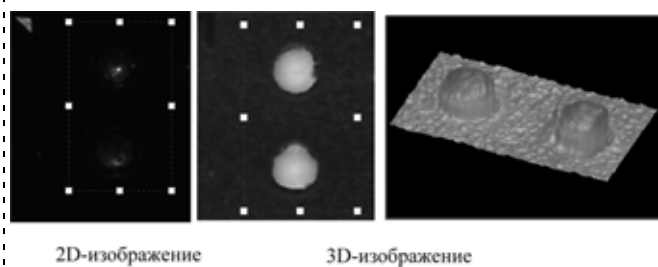


Рис. 11. Изображения бугорков припоя

Вид системы с разрешением в 5 мкм показан на рис. 8.

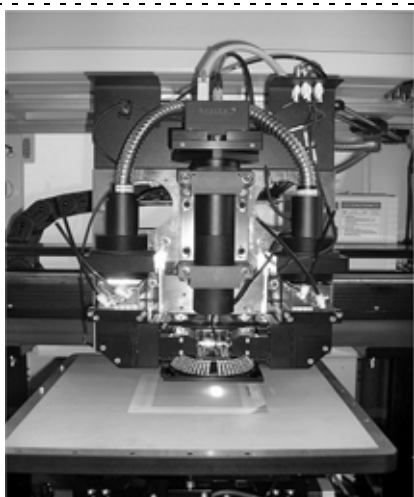
В настоящее время керамические платы заменяют обычные печатные платы в особых областях применения, требующих повышенной надежности, например, телекоммуникациях, медицинских, автомобильных системах [4, 5]. Одной из трехмерных задач контроля при производстве керамических плат является контроль заполненности отверстий (via), с помощью которых осуществляются электрические контакты между различными керамическими слоями. Необходимо, чтобы отверстия были полностью заполнены, но не переполнены, что возможно контролировать только с помощью анализа трехмерной информации. На рис. 9 показано двумерное изображение отверстий в керамической плате и соответствующее ему трехмерное изображение.

Технология "перевернутого кристалла" все чаще и чаще используется при изготовлении интегральных схем высокой степени интеграции, имеющих также большое число выводов. Такие схемы применяются, прежде всего, в таких изделиях, как центральные процессорные элементы (CPU), устройства программируемой логики высокой степени интеграции (FPGA, CPLD) и, в последнее время, также в схемах запоминающих устройств. В технологии "перевернутого кристалла" шаровидные выводы полупроводникового кристалла припаиваются к соответствующим бугоркам пасты припоя на подложке [6]. Высота и размеры бугорков припоя составляют несколько десятков микрометров, поэтому для их контроля требуется система высокого разрешения. Примеры двумерных и трехмерных изображений для подложек, используемых в этой технологии, показаны на рис. 10 и 11. Контролируемыми параметрами бугорков припоя являются средняя высота, площадь и объем, а также отклонения их положения на плоскости. Число выводов может составлять на схеме несколько тысяч. Полный оптический контроль в данном случае совершенно необходим, так как потеря даже одного контакта может привести к полной неработоспособности изделия.

Измерительная головка системы высокого разрешения показана на рис. 12. Принцип ее построения отличается от рассмотренной выше головки обычного разрешения наличием линейной ПЗС-камеры с тремя линейками по 4096 сенсоров, что необходимо для достижения повышенной ширины сканирования.

Основные характеристики системы высокого разрешения, применяемой для контроля керамических плат, приведены ниже.

Разрешение по осям X, Y, мкм. . . . .	5
Разрешение по оси Z, мкм. . . . .	0,05
Формат ПЗС-камеры. . . . .	4096 × 3
Скорость сканирования в точном режиме, мм/с . . . . .	35
Скорость сканирования в скоростном режиме, мм/с . . . . .	70
Калибровочный рабочий диапазон по оси Z, мм. . . . .	0,6
Период фазы по оси Z, мкм . . . . .	150



**Рис. 12. Измерительная головка системы высокого разрешения**

Такого разрешения обычно достаточно для большинства задач, требующих повышенной точности, но для некоторых задач (например, трехмерного контроля электронных компонентов), требуется еще более высокое разрешение — до 2...2,5 мкм на один пиксел.

### Выводы

Задачи трехмерного контроля в современных технологиях электронного производства могут быть успешно решены с помощью мехатронных систем с использованием активных СТЗ. Эти сис-

темы могут применяться в технологиях сборки печатных плат методом монтажа на поверхности, изготовления керамических многослойных структур, изготовления интегральных схем методом "перевернутого кристалла". Рассмотренные системы обеспечивают полный трехмерный и двумерный контроль объектов в реальном масштабе времени, что позволяет создавать на их основе современные автоматические линии.

### Список литературы

1. Дунин-Барковский И. И. Мехатронные системы для высокоточного трехмерного контроля размеров на основе активных СТЗ в современных технологиях // Мехатроника, автоматизация и управление. 2009. № 5. С. 31—35.
2. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение, М.: Машиностроение, 2006. 256 с.
3. Дунин-Барковский И. И. Трехмерный контроль изделий электронной промышленности с использованием средств технического зрения // Измерительная техника. 2006.
4. Чигуринский С. Особенности и преимущества производства многослойных структур на основе керамики (LTCC, HTCC, MLCC) // Компоненты и технологии. 2009. № 11.
5. Егоров Г., Капкин С., Стельмахович Л., Трофименков В., Хрипко В. Многослойные керамические микросхемы. Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2006. № 3.
6. Ли Н.-Ч. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и flip chip технологии. Технологии, 2006. 392 с.
7. Dunin-Barkowski I., Kim J. S. Accuracy problems in phase shift based 3D machine vision inspection systems // Proc. of SPIE, 2006. V. 6049. Optomechatronic machine vision. P. 6049P1-7.

УДК 681.5.011

**А. А. Грибков**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,  
Московский государственный  
технологический университет "Станкин"

## Повышение точности и производительности автоматизированных систем весового порционного дозирования материалов

*Рассматривается задача повышения точности и производительности весового порционного дозирования материалов. В качестве базовой технологии для решения заявленной задачи используется поэтапное дозирование. В рамках решения задачи оптимизации технологии дозирования рассматривается пример дозатора поэтапного действия и предлагаются алгоритмы оптимизации режимов поэтапного дозирования.*

**Ключевые слова:** порционное дозирование материалов, оптимизация, режим дозирования, производительность

### Введение

Задача повышения точности и производительности дозирования никогда не теряла своей актуальности и остроты. Однако до последнего време-

ни теоретические исследования в указанной области остаются весьма ограниченными. Кроме того, теоретические исследования проводились в основном в России и на Украине. К числу наиболее известных теоретических исследований относятся, в частности, работы Ю. В. Виденева [1] и Е. Б. Карпина [2]. Однако их работы были опубликованы в 1970-х годах и, несмотря на высокую теоретическую значимость, к настоящему времени утратили свою актуальность для практического использования.

В последние годы в России появилось лишь несколько теоретических работ в области структурного описания дозирующих систем и математического моделирования процесса дозирования [3—5]. Подавляющее большинство работ по дозированию имеют прикладной характер, круг рассматриваемых вопросов строго ограничен узкой предметной областью применения дозирующих систем: производство строительных материалов, пищевая промышленность, химическая промышленность и т. д.

Задача оптимизации процесса дозирования — сравнительно новая, и число работ в данной области пока невелико. Тем не менее, в последние годы в России и Украине интерес к данной теме вырос.

В частности, интересное исследование по компьютерному моделированию процесса дозирования ("Оптимизация процесса весового дозирования сыпучих материалов") было проведено в 2007 г. в Приднепровской Государственной академии строительства и архитектуры (г. Днепропетровск, Украина).

Определенное оживление интереса к проблеме повышения точности дозирования наблюдается и в промышленности, главным образом, в компаниях, специализирующихся на производстве систем точного дозирования. Ведущая российская фирма по производству систем точного дозирования ИнСАТ-СПб в последние годы значительно улучшила эксплуатационные характеристики своего оборудования, что позволило ей приблизиться по качеству к ведущим западным фирмам (Schenck Process, Mettler Toledo и др.). Это достигнуто, в частности, благодаря проведению фирмой ряда прикладных исследований в области оптимизации режимов дозирования.

В современных автоматизированных дозирующих системах решение задачи одновременного повышения точности и производительности в полной мере не обеспечивается. Высокая точность дозирования на существующих дозирующих системах может быть обеспечена лишь при условии многократного снижения производительности. Кроме того, для высокоточного дозирования требуются дорогостоящие прецизионные элементы: быстродействующие измерительные устройства, прецизионные следящие системы с адаптивным управлением и высокоскоростные прецизионные системы управления подачей материала.

Из практики порционного весового дозирования сыпучих материалов известно, что повышение точности дозирования может быть достигнуто путем снижения интенсивности подачи материала на заключительной стадии дозирования порции. На этом основан метод досыпки материала, когда основная часть материала дозируется с высокой интенсивностью, а остаточная, малая часть — с низкой интенсивностью [5]. В результате достигается компромисс между производительностью и точностью дозирования. По своей сути метод досыпки представляет собой реализацию режима дозирования с двумя этапами.

Несмотря на очевидные преимущества метода досыпки по сравнению с традиционным дозированием, возможности данного метода ограничены. Кроме того, остается нерешенной задача оптимального разбиения дозируемой массы по этапам. Вместо оптимального теоретически обоснованного разбиения дозируемой массы по этапам принимается разбиение, основанное на практических наблюдениях (80...90 % на этапе грубого дозирования, остальное — на "чистовом" этапе).

Анализ существующих исследований и подходов к повышению точности и производительности дозирования показывает, что, во-первых, задача

теоретического определения оптимального режима дозирования пока не решена и, во-вторых, задача оптимизации режима дозирования рассматривается в отрыве от синтеза оптимальных дозирующих систем.

Разработка технологии дозирования, как и разработка технологий в других областях, включает в себя разработку технологического оборудования (в данном случае дозатора или дозирующей системы) и определение параметров эксплуатации данного оборудования (в данном случае определение режима дозирования). В частном случае технология дозирования может разрабатываться под уже имеющееся технологическое оборудование, при этом разработка технологии будет заключаться лишь в определении режима дозирования.

Дозирование как процесс представляет собой подачу материала в виде потока с определенной интенсивностью  $Q$  (расходом). В случае порционного дозирования подача материала происходит не постоянно, а в течение некоторого заданного интервала времени  $T$ , за который необходимо подать полную массу  $M$  (объем  $V$ ) порции.

Режим дозирования — функция интенсивности подачи материала от времени, зависящая также от физико-механических свойств дозируемого материала, точности дозирующей системы, текущего значения массы порции и других факторов.

Оптимальным будет такой режим, при котором обеспечивается минимизация времени дозирования (максимизация производительности) или минимизация требований к точности элементов дозирующей системы и качеству дозируемого материала. В данной статье мы сосредоточимся на первом варианте оптимизации.

### Технология поэтапного дозирования

Одним из способов повышения точности и производительности дозирования является использование поэтапного дозирования [6, 7]. При поэтапном дозировании процесс выдачи порции разбивается на этапы, причем на каждом последующем этапе дозируется меньшая часть порции с меньшей интенсивностью подачи материала. Схема проектируемого дозатора должна быть выбрана таким образом, чтобы погрешность дозирования каждого этапа компенсировалась на последующем этапе. В этом случае заданная точность обеспечивается на последнем (чистовом) этапе путем предельно возможного уменьшения массы материала, дозируемого на этом этапе, и уменьшения подачи материала.

На рисунке показан дозатор [8], в котором реализуется метод поэтапного дозирования. Дозатор состоит из весовой камеры 1, расположенной на верхнем двухплечевом рычаге 2, свободно установленном на горизонтальной оси вращения 3. Двухплечевой рычаг 4 свободно установлен на горизонтальной оси вращения 5. Оси 3 и 5 закреплены в корпусе дозатора. Регулируемые по высоте упоры

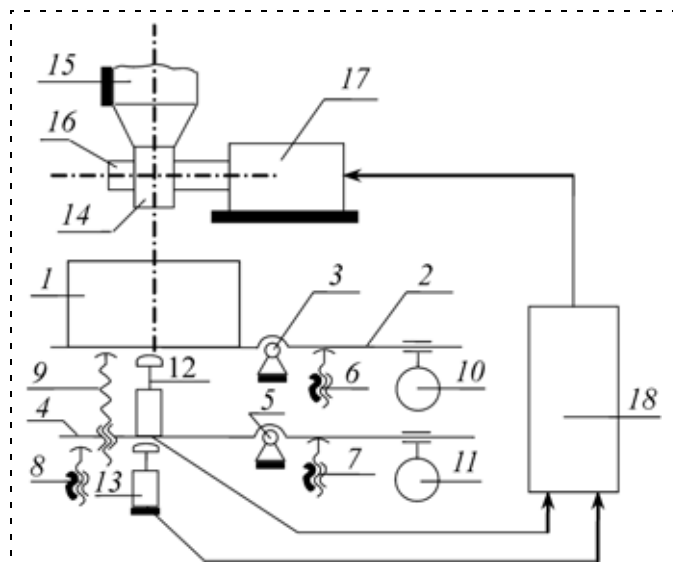


Схема весового дозатора поэтапного действия

6, 7 и 8 ввинчены в корпус, а упор 9 — в нижний рычаг 4 под верхним рычагом 2. Упоры расположены по два справа и по два слева (по рисунку) от осей вращения 3 и 5 с возможностью взаимодействия с нижними плоскостями рычагов. Оба рычага снабжены горизонтальными линейками и противовесами 10 и 11, которые установлены на рычагах с возможностью продольного перемещения. Бесконтактные регулируемые по высоте конечные выключатели 12 и 13 закреплены: первый — на нижнем рычаге 4 под верхним рычагом 2, второй — в корпусе под нижним рычагом 4. В трубке 14, через которую из бункера 15 подается дозируемый материал, расположен поворотный отсекатель 16, связанный с приводом вращения 17.

Дозатор работает следующим образом. В исходном положении канал трубки 14 закрыт, т. е. поворотный отсекатель 16 обращен к каналу трубки 14 своей глухой частью. Положение противовесов 10 и 11 на рычагах 2 и 4 соответствует полной дозируемой массе, причем противовесом 10 уравновешивается основная часть массы, а противовесом 11 — лишь незначительная ее часть (соответствующая точной дозировке). Упоры 6, 7, 8 и 9 отрегулированы по высоте таким образом, чтобы правые (по рисунку) плечи рычагов опирались на упоры 6 и 7, а левые плечи образовывали с упорами 8 и 9 небольшой зазор ( $\approx 1$  мм). Конечные выключатели 12 и 13 отрегулированы по высоте таким образом, чтобы зазор между их торцами и рычагами 2 и 4 в крайнем нижнем положении составлял  $\approx 1$  мм (но чуть больше зазора между рычагами и упорами).

При включении дозатора электрический сигнал через шкаф управления 18 передается приводу 17, что вызывает поворот отсекавателя 16 на определенный угол, в результате чего отверстие большого диаметра в отсекателе 16 (соответствующее грубой, предварительной дозировке) совмещается с каналом трубки 14, и в камеру 1 начинает поступать материал.

После заполнения камеры 1 количеством материала, соответствующим грубой дозировке, левое плечо верхнего рычага 2 перевешивает и, поворачиваясь, опирается на упор 9. Конечный выключатель 12 при этом подает сигнал через шкаф управления 18 приводу 17, в результате чего отсекатель 16 поворачивается на определенный угол, при котором с каналом трубки 14 совмещается отверстие отсекателя меньшего диаметра, соответствующее точной дозировке.

После заполнения камеры требуемой массой материала нижний рычаг 4 перевешивает и, поворачиваясь, упирается в упор 8. При этом срабатывает конечный выключатель 13, и по его сигналу через шкаф управления 18 привод 17 поворачивает отсекатель 16 на определенный угол, и он, обращаясь к каналу трубки 14 глухой стороной, прекращает подачу материала.

Для дальнейшей работы дозатора камера 1 снимается и на ее место устанавливается другая пустая камера. После чего дозатор включается, и цикл работы повторяется.

Высокая точность дозирования на данном дозаторе обеспечивается тем, что дозирование осуществляется в два этапа. На первом этапе дозируется основная часть массы, а на втором — незначительная ее часть. Если в процессе работы окажется, что на первом этапе в камеру поступило меньше материала, чем запланировано, то на втором этапе в камеру поступит больше материала в связи с тем, что дозатор настроен точно на требуемую массу. И наоборот, если окажется, что на первом этапе в камеру поступило больше материала, чем запланировано, то на втором этапе в камеру поступит меньше материала. В связи с тем, что масса, дозируемая на втором этапе, существенно меньше массы, дозируемой на первом этапе, интенсивность подачи материала на втором этапе может быть существенно снижена, а значит, снижена будет и погрешность дозирования. Поскольку основная часть массы дозируется на первом этапе, то за счет повышения интенсивности дозирования на нем можно компенсировать потери производительности вследствие малой интенсивности дозирования на втором этапе, а в конечном итоге можно ее повысить.

#### Оптимизация режима поэтапного весового дозирования

Для решения задачи оптимизации режима порционного весового дозирования необходимо ввести единую количественную характеристику, отражающую погрешность дозирующей системы (при заданных свойствах материала). Такой характеристикой является приведенная погрешность времени дозирования  $K$ . Физический смысл приведенной погрешности времени дозирования следующий: это время, за которое при заданной интенсивности подачи дозируется количество материала (масса или

объем), равное абсолютной погрешности дозирования.

Приведенная погрешность поэтапного весового дозирования в большинстве случаев приближенно постоянна для всех этапов дозирования. Более точное описание процесса дозирования требует учета зависимости приведенной погрешности времени дозирования  $K$  от параметров дозирования: интенсивности подачи материала  $Q$  и/или от количества дозированного материала  $\mu$ .

Рассмотрим случай зависимости  $K(Q)$ , когда по мере увеличения интенсивности подачи материала изменяется приведенная погрешность времени дозирования. Достаточный потенциал оптимизации обеспечивается линейной зависимостью, т. е. примем

$$K = K_0 + kQ,$$

где  $K_0, k$  — постоянные величины (коэффициенты).

В соответствии с условием, что масса, дозируемая на каждом этапе (кроме первого), в  $C$  раз больше погрешности предыдущего этапа, масса  $m_{i+1}$ , дозируемая на  $(i+1)$ -м этапе определится следующим образом:

$$m_{i+1} = Q_1 K(Q_i) C = Q_i (K_0 + kQ_i) C,$$

где  $Q_i$  — интенсивность дозирования на  $i$ -м этапе;  $C$  — коэффициент запаса по компенсации погрешности.

Проведем оптимизацию по критерию производительности для двухэтапного дозирования. Исходные зависимости для оптимизации:

$$Q_2 = \Delta / (K_0 + kQ_2); \quad Q_2 = \frac{\sqrt{K_0^2 + 4k\Delta} - K_0}{2k};$$

$$T_2 = \frac{CQ_1(K_0 + kQ_1)}{Q_2}; \quad T_1 = \frac{M - CQ_1(K_0 + kQ_1)}{Q_1},$$

где  $\Delta$  — допустимая абсолютная погрешность дозирования;  $Q_i, T_i$  — интенсивность подачи и продолжительность дозирования на  $i$ -м этапе.

Для нахождения оптимального режима про дифференцируем функцию времени дозирования

$$f = T_1 + T_2 = \frac{M}{Q_1} + C(K_0 + kQ_1) \left( \frac{Q_1}{Q_2} - 1 \right) \text{ по } Q_1:$$

$$\frac{df}{dQ_1} = -\frac{M}{Q_1^2} + Ck \left( \frac{Q_1}{Q_2} - 1 \right) + \frac{C(K_0 + kQ_1)}{Q_2} = 0.$$

Откуда имеем уравнение третьей степени:

$$\frac{2Ck}{Q_2} Q_1^3 + \left( \frac{CK_0}{Q_2} - Ck \right) Q_1^2 - M = 0.$$

Нахождение оптимального режима дозирования при трех- и четырехэтапном дозировании —

также задачи разрешимые. В случае трех или четырех этапов решение задачи сводится к нахождению действительных корней уравнения 10-й степени.

Рассмотрим случай зависимости  $K(\mu)$ , когда по мере роста дозированной массы  $\mu$  изменяется приведенная погрешность времени дозирования. Достаточный потенциал оптимизации обеспечивается линейной зависимостью, т. е. примем

$$K = K_0 + h\mu,$$

где  $K_0, h$  — постоянные величины (коэффициенты).

Масса, дозируемая на  $(i+1)$ -м этапе определится следующим образом:

$$m_{i+1} = Q_i K(\mu) C = Q_i \left( K_0 + h \sum_{j=1}^i Q_j T_j \right) C.$$

Проведем оптимизацию по критерию производительности для двухэтапного дозирования. Исходные зависимости для оптимизации:

$$Q_2 = \Delta / (K_0 + hM) = \Delta / [K_0 + h(Q_1 T_1 + Q_2 T_2)];$$

$$Q_2 T_2 = CQ_1 (K_0 + h(M - Q_2 T_2)) = \frac{CQ_1 (K_0 + hM)}{CQ_1 h + 1};$$

$$T_2 = \frac{CQ_1 (K_0 + hT_1 Q_1)}{Q_2}; \quad T_1 = \frac{M}{Q_1} - \frac{C(K_0 + hM)}{CQ_1 h + 1}.$$

Подставляя  $T_1$  в формулу для  $T_2$ , получаем

$$T_2 = \frac{CQ_1}{Q_2} \left( K_0 + hQ_1 \left[ \frac{M}{Q_1} - \frac{C(K_0 + hM)}{CQ_1 h + 1} \right] \right).$$

Найдем минимум функции  $f = T_1 + T_2$ :

$$\frac{df}{dQ_1} = \frac{C(hQ_2 K_0 C + K_0 + hM) Q_1^2 - 2MQ_2 CQ_1 h - MQ_2}{Q_2 Q_1^2 (CQ_1 h + 1)^2} = 0.$$

Из полученного квадратного уравнения можно найти  $Q_1$ :

$$Q_1 = \frac{MQ_2 Ch \pm \sqrt{M^2 Q_2^2 C^2 h^2 + MQ_2^2 C^2 h K_0 + MQ_2 C K_0 + M^2 Q_2 Ch}}{C(hQ_2 K_0 C + K_0 + hM)}.$$

Выбор одного из возможных значений оптимальной интенсивности дозирования на первом этапе (в соответствии с приведенной выше формулой) зависит от знака коэффициента  $h$ .

В случае трех этапов дозирования решение задачи сводится к уравнению 5-й степени, а в случае четырех этапов задачу оптимизации целесообразно решать численным методом, варьируя один из параметров и определяя остальные параметры через уравнение 4-й степени.

Рассмотрим случай зависимости  $K(Q, \mu)$ , когда приведенная погрешность времени дозирования зависит от интенсивности подачи  $Q$  и текущего значения массы порции  $\mu$ . Достаточный потенциал



оптимизации обеспечивается линейной зависимостью, т. е. примем

$$K = K_0 + kQ + h\mu,$$

где  $K_0$ ,  $k$ ,  $h$  — постоянные величины (коэффициенты).

Проведем оптимизацию по критерию производительности для двухэтапного дозирования. Исходные зависимости для оптимизации:

$$Q_2 = \Delta / (K_0 + kQ_2 + hM);$$

$$Q_2 = \frac{\sqrt{(K_0 + hM)^2 + 4k\Delta} - K_0 - hM}{2k};$$

$$T_2 = \frac{CQ_1(K_0 + kQ_1 + h(M - T_2Q_2))}{Q_2} =$$

$$= \frac{CQ_1(K_0 + kQ_1 + hM)}{Q_2(1 + ChQ_1)};$$

$$T_1 = \frac{M}{Q_1} - \frac{C(K_0 + kQ_1 + hM)}{(1 + ChQ_1)}.$$

Для нахождения оптимального режима продифференцируем функцию времени дозирования  $f = T_1 + T_2$  по  $Q_1$ :

$$\frac{df}{dQ_1} = \frac{k}{hQ_2} +$$

$$+ \frac{C^2h^2K_0Q_2 - CkQ_2h + C^2h^3MQ_2 + ChK_0 + Ch^2M - k}{h(1 + ChQ_1)^2Q_2} -$$

$$- \frac{M}{Q_1^2} = 0.$$

Откуда имеем уравнение четвертой степени относительно  $Q_1$ :

$$khC^2Q_1^4 + 2kCQ_1^3 + (C^2hK_0Q_2 - CkQ_2 + CK_0 +$$

$$+ ChM)Q_1^2 - 2MhQ_2CQ_1 - MQ_2 = 0.$$

В случае трех или четырех этапов оптимальный режим находится путем варьирования одного из параметров дозирования и определения остальных через уравнение четвертой степени.

### Выводы

На основе изложенного выше можно сделать следующие выводы:

1. Решение задачи повышения точности и производительности автоматизированных систем ве-

сового порционного дозирования материалов сводится к разработке оптимальной технологии дозирования, включающей в себя синтез оптимальной дозирующей системы и определение оптимальных режимов дозирования с помощью этой дозирующей системы.

2. Одной из перспективных технологий дозирования является поэтапное весовое дозирование, при котором обеспечивается компенсация погрешностей дозирования предыдущих этапов на последующих этапах.

3. Технология поэтапного дозирования может быть практически реализована на дозирующей системе, разработанной автором статьи (с соавторами).

4. Задача оптимизации режима поэтапного дозирования разрешима. В ряде случаев, когда оптимизационная задача не имеет аналитического решения, следует использовать численные методы, в том числе, основанные на варьировании одного или нескольких параметров дозирования в заданном диапазоне.

5. Решение задачи оптимизации режима дозирования в наиболее общем случае, когда приведенная погрешность времени дозирования зависит от текущих значений интенсивности подачи и дозированной массы, возможно исключительно программными средствами.

### Список литературы

1. Видинев Ю. Д. Дозаторы непрерывного действия. М.: Энергия, 1978, 184 с.
2. Карпин Е. Б. Средства автоматизации для измерения и дозирования массы. Расчет и конструирование. М.: Машиностроение, 1971. 469 с.
3. Давиденко П. Н. Исследование и разработка методов проектирования информационных систем на основе дозаторов дискретного действия: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Таганрог, 2005. 192 с.
4. Колбасин А. М. Автоматизация технологического процесса управления производством многокомпонентных сыпучих бетонных смесей с учетом ошибок дозирования: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2007. 151 с.
5. Сафронов В. Д. Автоматизация технологических процессов циклического дозирования компонентов асфальтобетонной смеси в комбинированном режиме грубого взвешивания и досыпки: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2005. 137 с.
6. Андреев Г. Н., Грибков А. А. Технология повышения точности дозирования материалов // Информационный листок МГЦНТИ. № 43—98.
7. Грибков А. А. Оптимизация поэтапного объемно-весового дозирования // Законодательная и прикладная метрология. 2001. № 5.
8. Грибков А. А., Андреев Г. Н. Патент РФ № 2110773 (весовой автоматический дозатор), 1998.

УДК 004.415.2

**В. Ф. Филаретов**, д-р техн. наук, зав. лаб.,  
**Д. А. Юхимец**, канд. техн. наук, науч. сотр.,  
**Э. Ш. Мурсалимов**, аспирант,  
Институт автоматике  
и процессов управления ДВО РАН

## Особенности использования программной среды MatLab для визуального моделирования движений многозвенных манипуляторов\*

*Обсуждается разработка метода сопряжения среды MatLab с внешней программой визуализации движения многозвенного манипулятора для создания моделирующего комплекса для исследования систем управления этими манипуляторами. Предложен алгоритм автоматической синхронизации вычислительных процессов MatLab, который основан на использовании методов теории автоматического управления. Проведенные вычислительные эксперименты полностью подтвердили работоспособность и эффективность предложенного подхода.*

**Ключевые слова:** моделирование, синхронизация, MatLab, многозвенные манипуляторы, визуализация, системы управления

**Введение.** При синтезе высококачественных систем управления многозвенными манипуляторами, работающими на высоких скоростях в условиях сильных взаимовлияний между всеми степенями подвижности, в настоящее время весьма эффективно используется компьютерное моделирование [1–3], которое позволяет существенно сократить время и стоимость разработок. При этом желательно осуществлять не только моделирование динамики исполнительных механизмов и их систем управления, но и взаимодействие манипуляторов с объектами, находящимися в рабочей зоне. Сейчас существует большое число программных сред, позволяющих осуществлять визуальное моделирование работы сложных механизмов и алгоритмов их управления. Наиболее известными и эффективными моделирующими комплексами являются Robotic Studio [4], RoboSim [5], Universal Mechanism [6], Cosimir Robotics [7]. Однако все эти комплексы не имеют удобных средств для проектирования и всестороннего исследования синтезированных систем управления приводами указанных объектов.

\* Работа поддержана РФФИ (грант 10-07-00395) и ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России".

В частности, комплекс Robotic Studio предназначен для разработки конструкции манипуляторов различного назначения, выбора конфигурации их бортового оборудования, синтеза алгоритмов управления многозвенниками и моделирования их взаимодействий с окружающей средой. Комплекс Universal Mechanism позволяет провести точное моделирование движений различных манипуляторов и их взаимодействия с объектами окружающей среды. Среда RoboSim используется в основном для моделирования в виртуальном пространстве движений манипуляторов в режиме телеуправления, а среда Cosimir Robotics — для разработки и моделирования сложных технологических процессов. Однако с помощью всех этих комплексов и сред не удастся выполнить синтез систем управления исполнительными устройствами манипуляторов, а динамика объектов управления моделируется в них в весьма упрощенном виде.

Сейчас основным инструментом разработчика систем управления динамическими объектами является среда MatLab [8], которая имеет в своем составе как средства синтеза этих систем, так и средства их анализа. Поэтому проектировщику систем управления приводами многозвенных манипуляторов целесообразно использовать именно эту среду. Тем не менее, используемые в MatLab инструменты для визуализации пространственного движения различных динамических объектов (Virtual Reality Toolbox) не удобны для создания трехмерных моделей многозвенных манипуляторов, а также моделей изменяющейся окружающей среды. В результате для одновременного моделирования пространственных движений манипуляторов с различными кинематическими схемами и систем управления их приводами, а также особенностей их взаимодействия с окружающей средой в MatLab целесообразно включить дополнительные средства визуального моделирования, которые позволят обеспечить автоматизированное создание всех необходимых моделей. Для этого предварительно необходимо решить проблему создания механизма обмена данными между MatLab и программой визуализации, а также проблему синхронизации всех вычислительных процессов при этом обмене. Эффективному решению этой задачи и посвящена данная статья.

### Выбор механизма и создание архитектуры системы обмена данными

Известно, что существуют три основных способа обмена данными между сторонними приложениями и средой MatLab. Способы, использующие

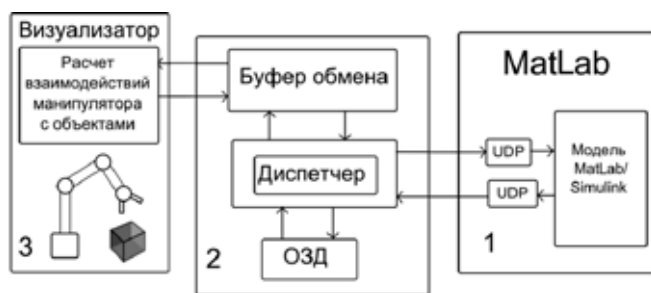


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема моделирующего комплекса

технологии Dynamic Data Exchange (DDE) и Component Object Model (COM), являются весьма трудоемкими и реализуются только на компьютерах, работающих под управлением операционной системой Windows. Наиболее удобным и универсальным способом обмена данными между средой MatLab и внешними программами является использование протокола UDP, работающего независимо от операционной системы, в которой запущен MatLab, и поддержка которого есть как в MatLab, так и во всех современных языках программирования. Кроме того, протокол UDP позволяет использовать несколько компьютеров, объединенных в локальную сеть, что во многих случаях позволяет увеличить скорость моделирования.

Обобщенная функциональная схема предлагаемого моделирующего комплекса, построенного на основе UDP-протокола, показана на рис. 1. Из этой схемы видно, что указанный комплекс состоит из трех основных блоков, которые обмениваются между собой соответствующими данными.

Динамические модели приводов манипуляторов и их систем управления реализуются в среде MatLab/Simulink в первом блоке, в котором происходит задание траекторий движения манипуляторов и моделирование динамики их управляемых приводов. Для обмена данными по протоколу UDP между этим и двумя другими блоками разработано два вида подблоков: первый — для отправки данных из MatLab во внешнюю программу, а второй — для получения данных из внешней программы о взаимодействии манипуляторов с объектами окружающей среды.

Второй блок обеспечивает взаимодействие модели, работающей в среде MatLab, с визуализатором, который реализует функции разбора дейтаграмм, приходящих из этой модели, обмен данными с визуализатором, а также подготовку и отправку дейтаграмм в MatLab. Кроме того, в указанном блоке на основе информации о текущей конфигурации манипулятора и о параметрах движения каждого его звена (обобщенных координатах, скоростях их изменения и ускорениях) с использованием рекуррентного алгоритма [1] решаются обратные задачи динамики (ОЗД) для многозвенников, т. е. рассчитываются моментные воздействия во всех суставах и взаимовлияния между всеми степенями подвижности.

В третьем блоке задаются кинематические схемы и параметры манипуляторов, осуществляется визуализация их пространственных движений в рабочей зоне, а также определяются взаимодействия схватов многозвенников с объектами рабочего пространства.

Обмен данными между указанными блоками комплекса организован следующим образом. Моделирование динамики приводов манипуляторов происходит в машинном времени  $\tau$  с шагом интегрирования  $h$ . Так как в зависимости от сложности моделей приводов и желаемой точности моделирования величина  $h$  может иметь малые значения, то передавать данные из модели в визуализатор на каждом шаге интегрирования нецелесообразно. Передачу данных из модели в визуализатор желательно организовывать с шагом  $\Delta\tau = mh$ , где  $m$  — заданное число шагов интегрирования модели. При этом в визуализатор из модели передается вектор чисел с плавающей точкой двойной точности, имеющий формат  $S = \{\tau_i, \{q_1, \dot{q}_1, \ddot{q}_1\}, \dots, \{q_N, \dot{q}_N, \ddot{q}_N\}\}$ , где  $\tau_i$  — текущий момент машинного времени  $\tau$ ;  $q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i$  — соответственно, обобщенная координата, скорость и ускорение в  $i$ -й степени подвижности манипулятора;  $N$  — число степеней подвижности манипулятора. Данные из визуализатора в модель поступают в виде вектора чисел с плавающей точкой, имеющего формат  $R = \{\tau_v, \{P_1, \dots, P_N\}\}$ , где  $\tau_v$  — момент машинного времени, для которого были рассчитаны данные, передаваемые в модель;  $P_1, \dots, P_N$  — силовые и моментные воздействия на соответствующие приводы манипулятора. При необходимости визуализатор может передавать и дополнительные данные: о положении и пространственной ориентации схватов в абсолютной системе координат, о пространственной ориентации оптических осей телекамер и др., используемые для формирования сигналов управления приводами.

Для удобства организации процесса обмена данными между моделью MatLab/Simulink и внешней программной средой с заданными параметрами были разработаны два дополнительных подблока Simulink. Для приема данных задавали ip-адрес и номер порта, на который должны отправляться данные, число элементов в передаваемом векторе данных и интервал приема  $\Delta\tau_s$ . При передаче данных кроме указанного набора информации задавали дополнительный параметр, использующийся для синхронизации вычислительных процессов. О его выборе будет сказано ниже.

Основными элементами в указанных подблоках Simulink являются  $s$ -функции, осуществляющие прием и передачу данных по протоколу UDP. Инициализация указанного протокола в этих функциях происходит в начале процесса моделирования при создании объектов типа UDP, параметрами которых являются заданные пользователем параметры обмена данными. Передача и прием данных по UDP-протоколу осуществляется с помощью библиотечных функций MatLab `fwrite(·)` и `fread(·)`, парамет-

рами которых служат экземпляры созданных классов UDP, а также вектор передаваемых данных (для функции fwrite(·)) и число байтов, передающихся в одной дейтаграмме (для функции fread(·)).

Главной особенностью рассматриваемой системы моделирования является наличие двух параллельных вычислительных процессов, происходящих в двух разных приложениях с разной скоростью. При этом учитывается, что процесс передачи блока данных (в том числе и при использовании локальной сети) занимает определенное время. Поэтому может возникнуть ситуация, когда данные о внешних воздействиях, рассчитанные в визуализаторе, окажутся устаревшими для текущего шага машинного времени в MatLab. Это неизбежно приведет к рассогласованию моделирования движений манипуляторов и работы его систем управления. Для устранения указанной ситуации возникает необходимость синхронизации скорости протекания всех вычислительных процессов. Эта задача будет подробно рассмотрена и решена ниже.

### Особенности синхронизации вычислительных процессов и процессов моделирования динамики манипуляционных систем в MatLab

Пусть машинное время моделирования в MatLab и промежуток реального времени  $t$ , прошедший с начала процесса моделирования, определяются соотношением

$$\tau = k_t t, \quad (1)$$

где  $k_t > 0$  — коэффициент, определяющий скорость моделирования.

В настоящее время известен метод синхронизации вычислительных процессов в MatLab, обменивающихся данными по UDP-протоколу [9]. Он предполагает, что во всех этих процессах принимается одинаковая величина коэффициента  $k_t$ , что обеспечивает одинаковый темп расчетов и, соответственно, их синхронизацию. Однако для реальных систем заранее сложно определить скорость выполнения расчетов в различных частях комплекса и точно выбрать значение коэффициента  $k_t$ . Поэтому в данной работе предлагается другой метод, позволяющий автоматически обеспечить синхронную работу MatLab и внешних программ.

Вначале сформулируем условия синхронизации. Пусть в некоторый момент машинного времени  $\tau_{si}$  из MatLab посылаются данные во внешнюю программу. Указанные данные передаются в эту программу за время  $t_{mp}$ , обрабатываются в ней в течение времени  $t_v$ , а затем результат отсылается обратно в MatLab за время  $t_{pm}$ . В результате с учетом (1) момент машинного времени  $\tau_r^{si}$ , в который в MatLab вернутся после обработки внешней программой данные, полученные ранее для момента  $\tau_{si}$ , будет равен

$$\tau_r^{si} = \tau_{si} + k_t(t_{mp} + t_v + t_{pm}). \quad (2)$$

Если разность  $\tau_r^{si} - \tau_{si}$  велика, то данные, поступившие в MatLab из внешней программы, будут устаревшими для их использования в текущий момент машинного времени, а результаты моделирования будут ошибочными. Для устранения указанной ситуации необходимо выполнение условия

$$\tau_r^{si} - \tau_{si} = k_t(t_{mp} + t_v + t_{pm}) = \tau_\varepsilon \leq \tau_{\text{доп}}, \quad (3)$$

где  $\tau_{\text{доп}}$  — допустимая задержка при поступлении данных из внешней программы в среду MatLab. Величина  $\tau_{\text{доп}}$  зависит от динамических свойств модели и возможной скорости изменения внешних воздействий. При этом всегда должно выполняться неравенство  $\tau_{\text{доп}} \geq \Delta t$ .

Из выражения (3) следует, что уменьшить величину  $\tau_\varepsilon$  можно, только уменьшая коэффициент  $k_t$ , т. е. скорость моделирования в MatLab. Указанное замедление процесса моделирования можно обеспечить, если в определенные моменты времени, например, при приеме данных, приостанавливать процесс моделирования на некоторый малый промежуток времени  $t_p$ . В результате возникает задача выбора такой величины  $t_p$ , которая позволит обеспечить выполнение условия (3), но при этом не приведет к избыточному замедлению процесса моделирования. Поскольку заранее сделать этого невозможно, то в данной статье предлагается применить подход, использующийся в системах автоматического управления. Суть этого подхода состоит в том, чтобы величину  $t_p$  формировать в зависимости от текущего значения разности  $\tau_\varepsilon - \tau_{\text{доп}}$  с помощью следующего выражения:

$$t_p = \begin{cases} k_p(\tau_\varepsilon - \tau_{\text{доп}}), & \text{если } \tau_\varepsilon > \tau_{\text{доп}}; \\ 0, & \text{если } \tau_\varepsilon \leq \tau_{\text{доп}}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $k_p$  — некоторый положительный коэффициент. Приостановка процесса моделирования на промежуток времени  $t_p$  может быть осуществлена с помощью библиотечной функции MatLab pause(·).

Очевидно, что для синхронизации процесса моделирования в MatLab с вычислительным процессом, осуществляемым внешней программой, необходимо, чтобы промежуток реального времени  $\Delta t$  между отсылкой данных из MatLab и получением данных после обработки обратно был равен времени  $t_{mp} + t_v + t_{pm}$ . Только в этом случае можно считать, что все вычислительные процессы в моделирующем комплексе полностью синхронизированы, т. е. протекают с одинаковой скоростью. Следует отметить, что в случае, когда  $\Delta t > t_{mp} + t_v + t_{pm}$ , дополнительной синхронизации указанных процессов не требуется, так как при  $\tau_{\text{доп}} \geq \Delta t$  всегда будет выполняться условие (3). Указанная ситуация возможна, когда происходит моделирование сложной динамической системы или когда шаг моделирования достаточно мал.

Если же время моделирования в MatLab меньше, чем время выполнения расчетов во внешней программе и справедливо неравенство  $\Delta t < t_{mp} + t_v + t_{pm}$ , то условие (3) нарушается. В этом случае введение

дополнительной задержки  $t_p$  увеличивает промежуток времени  $\Delta t$ , который стремится к  $t_{mp} + t_v + t_{pm}$ , т. е. синхронизация вычислительных процессов практически обеспечивается.

Необходимым условием работоспособности предложенного алгоритма синхронизации является передача вместе с основными данными из MatLab значения текущего машинного времени, для которого они были рассчитаны, а также передача этого значения из внешней программы обратно в MatLab. Указанная операция, обеспечивая автоматическую синхронизацию всех вычислительных процессов, не приводит к существенному увеличению объема передаваемых данных.

Следует отметить и еще одну важную особенность работы предложенного алгоритма синхронизации. Дело в том, что в процессе моделирования при приеме данных в MatLab может возникнуть ситуация, когда в буфере udp-порта будет содержаться несколько дейтаграмм. В этом случае следует пользоваться только теми данными, которые рассчитаны для машинного времени, наиболее близкого к текущему. В связи с этим при получении данных в MatLab необходимо выполнять следующие действия:

1) проверять число байтов, содержащихся в буфере udp-порта. Оно хранится в поле ByteAvailable объекта udp, который используется для приема данных;

2) определять число пакетов данных, доступных для считывания:

$$n = \text{udp.ByteAvailable} \text{ div } \{\text{Count\_rec} + 1\} * 8,$$

где Count\_rec — число переменных во входящем пакете данных, используемых в MatLab; div — операция взятия целой части от деления;

3) считывать  $n$  пакетов с заданного udp-порта и передавать последний пакет в MatLab.

Получать необходимые для работы данные можно и путем уменьшения размера буфера udp-порта до размера принимаемой дейтаграммы, используя поле InputBufferSize объекта udp. После соответствующего уменьшения в буфере udp-порта будут содержаться только самые "свежие" данные, однако при этом будет теряться информация, которая может потребоваться для дополнительных вычислений в MatLab.

### Результаты вычислительного эксперимента

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма

синхронизации были проведены вычислительные эксперименты, в которых использовались два персональных компьютера, подсоединенных к одной локальной сети. На одном компьютере проходил процесс моделирования в MatLab/Simulink, а на втором работала внешняя программа, принимающая данные из MatLab и возвращающая их обратно.

В модели MatLab задавали тестовый сигнал в виде гармонической функции, который с периодом в 0,01 с машинного времени передавался во внешнюю программу. Внешняя программа работала в двух режимах. В первом имитировалась минимальная вычислительная нагрузка (данные принимались и сразу же отсылались обратно), а во втором имитировался большой объем вычислений, когда после приема данные отсылались внешней программой с задержкой в 30 мс. При этом полагали, что  $\tau_{\text{доп}} = 0,01$  с,  $k_p = 0,1$ .

На рис. 2 показан процесс моделирования в случае, когда отсутствует синхронизация между MatLab и внешней программой, при этом внешняя программа работает в режиме имитации минимальной вычислительной нагрузки. На рис. 2, а цифрой 1 обозначен тестовый сигнал, который передается из MatLab во внешнюю программу, а цифрой 2 — сигнал, который поступает в MatLab. Из этих рисунков видно, что при отсутствии синхронизации даже при минимальной вычислительной нагрузке во внешней программе величина  $\tau_c$  (рис. 2, б) может достигать 0,7 с, что приводит к су-

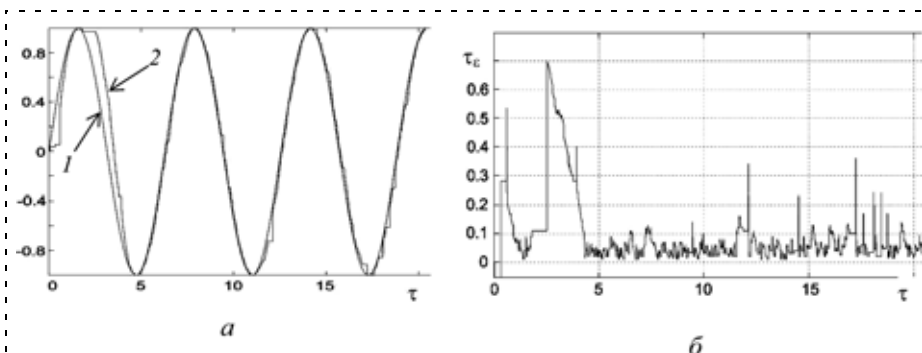


Рис. 2. Процесс моделирования без синхронизации (а) и при минимальной вычислительной нагрузке во внешней программе (б)

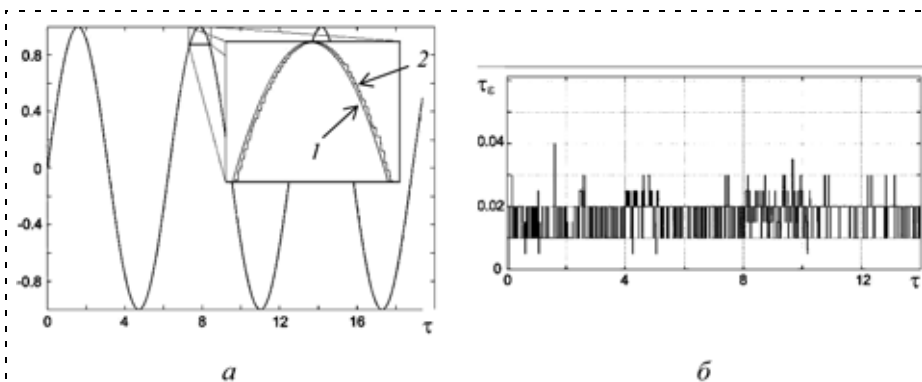


Рис. 3. Процесс моделирования с синхронизацией и при минимальной вычислительной нагрузке во внешней программе

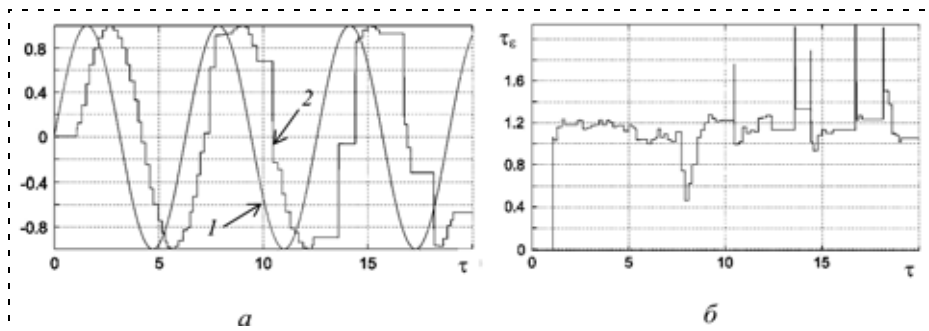


Рис. 4. Процесс моделирования без синхронизации и при имитации вычислительной нагрузки во внешней программе

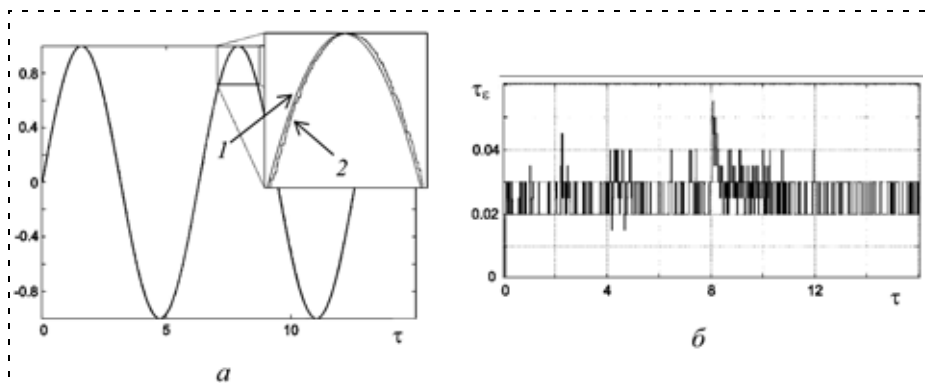


Рис. 5. Процесс моделирования с синхронизацией и при имитации вычислительной нагрузки во внешней программе

ществленному искажению исходного сигнала и результатов моделирования в целом.

На рис. 3 показан процесс моделирования с использованием предложенного в данной статье алгоритма синхронизации. При этом, как и ранее, внешняя программа работала в режиме имитации минимальной вычислительной нагрузки. Обозначения на рис. 3, а и последующих рисунках аналогичны обозначениям на рис. 2, а.

Из рис. 3 видно, что использование предложенного алгоритма синхронизации позволяет более чем в 15 раз уменьшить величину  $\tau_\epsilon$ . При этом следует отметить, что условие (4) позволяет приблизить величину  $\tau_\epsilon$  к  $\tau_{\text{доп}}$ , но не гарантирует выполнение условия (3) на протяжении всего процесса моделирования (рис. 3, б). Это объясняется тем, что при использовании условия (4) замедление процесса моделирования происходит тогда, когда условие (3) нарушается. Однако при необходимости значение  $\tau_{\text{доп}}$  всегда можно задать меньше, чем требуется для осуществления конкретного процесса моделирования. Это обеспечит неизменное выполнение условия (3) в течение всего процесса моделирования.

На рис. 4 и 5 показан процесс моделирования в случае, когда во внешней программе имитируется большая вычислительная нагрузка (задержка составляет 30 мс) при отсутствии синхронизации и с использованием разработанного алгоритма синхронизации, соответственно. Из рис. 4 видно, что отсутствие синхронизации приводит к тому, что

данные из внешней программы в основном поступают в MatLab с задержкой машинного времени более чем на 1 с, которая для большинства динамических объектов (особенно для приводов манипуляторов) является недопустимо большой.

Однако из рис. 5 видно, что при той же самой вычислительной нагрузке предложенный алгоритм синхронизации позволяет уменьшить задержку поступления необходимых данных почти в 30 раз (в основном до 0,04 с машинного времени). При этом можно отметить, что увеличение времени расчетов во внешней программе, хоть и незначительно, но все же повышает  $\tau_\epsilon$  (рис. 3, б и 5, б). Но указанный эффект можно компенсировать увеличением коэффициента  $k_p$ .

Таким образом, результаты вычислительных экспериментов подтвердили не только работоспособность и эффективность предложенного алгоритма автоматической синхронизации MatLab с внешней программой, но и необходимость введения такой синхронизации.

## Заключение

В данной статье предложен и исследован новый подход к построению моделирующего комплекса, обеспечивающего совместную работу среды MatLab, используемой при моделировании движения манипуляторов (с учетом их приводов и систем управления), и внешней программы визуализации их движения с учетом взаимодействия с окружающей средой. При этом на основе UDP-протокола был создан и апробирован механизм обмена данными между всеми частями указанного моделирующего комплекса. Применение этого протокола позволило осуществлять обмен данными независимо от вида используемой операционной системы, в которой работает созданный комплекс, а также использовать в процессе моделирования несколько компьютеров, соединенных в локальную сеть, что в отдельных случаях позволяет существенно увеличить скорость моделирования.

Для эффективной работы указанного комплекса был создан алгоритм автоматической синхронизации вычислительных процессов, протекающих в MatLab и во внешней программе, который построен по принципу автоматической системы управления с обратной связью и позволяет гаран-

тировать корректность моделирования. Были проведены вычислительные эксперименты, которые полностью подтвердили работоспособность и эффективность предложенного подхода.

#### Список литературы

1. **Филаретов В. Ф.** Синтез самонастраивающихся систем управления приводами манипуляторов. Владивосток: Изд. ДВГТУ, 2000. 304 с.

2. **Зенкевич С. Л., Ющенко А. С.** Основы управления манипуляционными роботами. М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2004. 480 с.  
3. **Siciliano B., Khatib O.** Handbook of robotics. Springer Verlag, 2008. 1628 p.  
4. **Robotic Studio.** <http://www.microsoft.com/robotics/>  
5. **RobSim.** <http://www.robsim.dynsoft.ru/>  
6. **Universal Mechanism.** <http://umlab.ru/>  
7. **Casimir robotica.** [www.virtual-environments.com](http://www.virtual-environments.com)  
8. **MatLab.** <http://www.mathworks.com/>  
9. **Синхронизация** нескольких экземпляров MatLab по UDP протоколу. <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book3/14.php>.

УДК 621.3.084.2

**С. Л. Зенкевич**, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
**А. В. Назарова**, канд. техн. наук, доц.,  
Научно-учебный центр "Робототехника"  
МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
zenkev@bmstu.ru, avn@bmstu.ru

## Оценка параметра по информации от нескольких датчиков

*Рассмотрена задача построения оценки скалярного параметра, измеряемого несколькими датчиками с различной точностью. В классе линейных оценок построена несмещенная и эффективная оценка параметра. Показано, что точность этой оценки выше, чем точность измерений каждого из датчиков. Приведен простой пример.*

**Ключевые слова:** сенсорная система, измерение, оценка параметра

### Введение

Тенденция развития мобильных роботов (впрочем, не только их, но и многих других технических систем) характеризуется использованием большого числа бортовых датчиков, позволяющих обеспечить полностью или частично автономное поведение робота при его движении в недетерминированной среде. К таким информационным системам относятся, в частности, лазерные дальномеры, телевизионные системы, инерциальные навигационные системы (гироскопические датчики угловых скоростей, акселерометры), спутниковые навигационные системы и т. д. Задача комплексирования информации состоит, вообще говоря, в объединении данных от различных сенсорных систем в целях получения информационной модели, более богатой, чем та, которую мы имеем, используя отдельные датчики. Хорошим примером комплексирования является объединение дальнометрической и телевизионной информации [1], позволяющее получить качественно новое описание внешней среды.

В данной статье рассматривается частный случай задачи комплексирования, состоящий в следующем. Часто информация об одном и том же па-

раметре движения поступает от нескольких независимых источников. Так, например, использование лазерного дальномера, установленного на борту мобильного робота, позволяет оценить его угловую и линейную скорости [2]. Вместе с тем, те же параметры мы измеряем с помощью датчиков инерциальной навигационной системы, и тогда возникает вопрос: что делать с этими измерениями и нельзя ли получить оценку этих параметров, лучшую (в том или ином смысле), чем каждое из измерений, объединяя полученную информацию? Решение именно этой задачи и рассматривается в данной статье.

### Постановка задачи

Сформулируем задачу следующим образом.

Пусть  $q$  — скалярный параметр, который мы хотим оценить, используя измерения  $z_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , имеющие вид

$$z_i = q + \xi_i. \quad (1)$$

Здесь  $\xi_i$  — шумы в измерениях, представляющие собой случайные величины со следующими статистическими характеристиками

$$E(\xi_i) = 0;$$

$$E(\xi_i \xi_j) = d_i \delta_{ij},$$

где  $d_i$  — дисперсия шума в  $i$ -м измерении;  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера. Мы предполагаем, таким образом, независимость шумов в измерениях, полученных от разных датчиков, что кажется естественным. Сформулируем теперь оценку  $\hat{q}$  параметра  $q$  по совокупности измерений  $z_1, z_2, \dots, z_n$  в виде их линейной комбинации:

$$\hat{q} = a_1 z_1 + a_2 z_2 + \dots + a_n z_n. \quad (2)$$

Коэффициенты  $a_1, a_2, \dots, a_n$  будем выбирать так, чтобы выполнялись стандартные требования к оценке:

1. Несмещенность:

$$E(\hat{q}) = q. \quad (3)$$

2. Эффективность (т. е. минимум дисперсии ошибки оценки):

$$(a_1^*, a_2^*, \dots, a_n^*) = \arg \min_{a_i} E((\hat{q} - q)^2).$$

Безусловно, выбор оценки параметра в форме (2) является произвольным и диктуется лишь простотой реализации и возможностью аналитического исследования статистических характеристик оценки. Проблема поиска функции  $\hat{q} = f(a_1, a_2, \dots, a_n)$ , обеспечивающей минимальное значение дисперсии ошибки оценки, в данной статье не рассматривается.

Переформулируем теперь задачу в более компактной форме. Введем векторы  $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)^T$ ,  $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)^T$ ,  $e = (1, 1, \dots, 1)^T$ ,  $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$ . Тогда уравнение измерений (1) будет иметь вид

$$z = qe + \xi, \quad (4)$$

где  $z$  — вектор измерений,  $\xi$  — случайный вектор, характеризующий шумы в измерениях со следующими статистическими характеристиками:

$$E(\xi) = 0; \\ E(\xi\xi^T) = D.$$

Здесь  $D$  — матрица ковариаций шумов, являющаяся в силу независимости диагональной:

$$D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n),$$

где  $d_i$  — как и ранее, дисперсии шумов в измерении  $i$ -го датчика.

Оценка  $\hat{q}$  параметра  $q$  формируется в виде

$$\hat{q} = a^T z. \quad (5)$$

Задача состоит в нахождении вектора  $a^*$ , обеспечивающего несмещенность и эффективность оценки  $\hat{q}$ :

$$a^* = \arg \min_{a_i} E((\hat{q} - q)^2).$$

**Решение.** Удовлетворим сначала условие несмещенности (3). Из (5) с учетом (4) имеем

$$E(\hat{q}) = a^T E(z) = qa^T e = q.$$

Из этого соотношения следует

$$a^T e = 1 \quad (6)$$

или

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1.$$

Найдем теперь дисперсию ошибки оценки. Имеем

$$d(\hat{q}) = E((\hat{q} - q)^2) = E((a^T qe + a^T \xi - q)^2).$$

Учитывая соотношение (6), получим

$$d(\hat{q}) = E((a^T \xi)^2) = a^T E(\xi\xi^T) a = a^T D a.$$

Таким образом, задача свелась к нахождению экстремума скалярной функции векторного аргумента

$$d(\hat{q}) = f(a) = a^T D a \quad (7)$$

при условии (6). Эта классическая задача решается введением скалярного множителя Лагранжа и последующей минимизации функции

$$\tilde{f}(a, \lambda) = a^T D a + \lambda(a^T e - 1).$$

Дифференцируя эту функцию по вектору  $a$  и скаляру  $\lambda$  и учитывая симметричность матрицы ковариаций  $D$ , получим следующую систему линейных уравнений относительно  $a$  и  $\lambda$ :

$$2Da + \lambda e = 0; \quad (8)$$

$$a^T e = 0. \quad (9)$$

Учитывая невырожденность  $D$ , имеем из (8)

$$a = -\lambda D^{-1} e / 2.$$

Подставляя найденное  $a$  в (9), найдем  $\lambda$ , после чего окончательное выражение для искомого вектора  $a^*$  будет иметь вид

$$a^* = D^{-1} e / e^T D^{-1} e. \quad (10)$$

Нетрудно видеть, что в скалярной форме искомые компоненты вектора  $a$  в соответствии с (10) имеют вид

$$a_i^* = \frac{1}{d_i} / \sum_{j=1}^n \frac{1}{d_j}. \quad (11)$$

Соотношение (11) означает, что вес каждого измерения в формировании несмещенной и эффективной оценки параметра  $q$  тем больше, чем точнее это измерение, т. е. чем меньше дисперсия соответствующего шума, что кажется естественным. Таким образом, соотношения (5) и (11) определяют окончательный результат.

Представляет несомненный интерес ответ на вопрос, какова дисперсия ошибки оценки, т. е. значение минимизируемой функции (7)  $f(a^*)$ . Вычислим ее. Имеем в соответствии с (7) после простых преобразований:

$$d(\hat{q}) = f(a^*) = a^{*T} D a^* = 1 / e^T D^{-1} e$$

или

$$1/d(\hat{q}) = e^T D^{-1} e.$$

В скалярном виде это соотношение имеет вид

$$1/d(\hat{q}) = \sum_{j=1}^n \frac{1}{d_j}.$$

Таким образом, дисперсия полученной несмещенной эффективной оценки параметра является средним геометрическим дисперсий шумов во всех



измерениях. Это, в частности, означает, что  $d(\hat{q})$  обладает следующим свойством:

$$d(\hat{q}) < \min_i d_i.$$

Таким образом, сколь бы ни была неточна одна из измерительных систем, ее участие в формировании оценки параметра улучшает качество оценивания. Заметим, что тот же результат можно получить, воспользовавшись методом рекуррентной фильтрации. Действительно, пусть уравнение объекта имеет вид

$$\begin{aligned} q_{i+1} &= q_i, \quad i = 1, 2, \dots, n; \\ q_1 &= q. \end{aligned} \quad (12)$$

Уравнение же измерений остается прежним:

$$z_i = q_i + \xi_i.$$

Уравнение (12) означает постоянство параметра  $q$ , при этом объект эволюционирует не во временной области, как это чаще всего бывает, но в пространстве номеров измерителей.

Применение известной процедуры к построению рекуррентной оценки  $\hat{q}_i$  параметра  $q$  позволяет получить следующие соотношения:

$$\hat{q}_{i+1} = \hat{q}_i + \frac{p_i}{p_i + d_i} (z_i - \hat{q}_i),$$

где дисперсия ошибки оценки вычисляется следующим образом:

$$p_{i+1} = \frac{p_i d_i}{p_i + d_i}$$

или

$$\frac{1}{p_{i+1}} = \frac{1}{p_i} + \frac{1}{d_i}.$$

Нетрудно видеть, что это соотношение совпадает с полученным ранее. Заметим, однако, что использование методов рекуррентной фильтрации для вычисления эффективной оценки в данном случае нецелесообразно, поскольку число датчиков, измеряющих один и тот же параметр, как правило, невелико.

### Пример

Пусть мы имеем два датчика, измеряющих некоторый параметр  $q$ :

$$\begin{aligned} z_1 &= q + \xi_1; \\ z_2 &= q + \xi_2. \end{aligned}$$

Тогда несмещенная эффективная оценка параметра  $q$  строится следующим образом:

$$d(\hat{q}) = \frac{d_2}{d_1 + d_2} z_1 + \frac{d_1}{d_1 + d_2} z_2,$$

где  $d_1$  и  $d_2$  — дисперсии шумов  $\xi_1$  и  $\xi_2$  соответственно. Дисперсия ошибки оценки  $p(\hat{q})$  имеет вид

$$p(\hat{q}) = \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}.$$

Пусть  $d_1 = 1$  (точный датчик),  $d_2 = 100$  (неточный датчик).

$$\text{Тогда } \hat{q} = \frac{100}{101} z_1 + \frac{1}{101} z_2,$$

что означает, что вклад плохого датчика в формирование оценки невелик. Дисперсия ошибки оценки имеет вид

$$p(\hat{q}) = 0,9901 < 1,$$

т. е. использование плохого датчика позволило получить точность оценки лучшую (на один процент), чем обеспечил бы один точный датчик.

### Заключение

Показано, каким образом следует формировать оценку некоторого параметра по нескольким независимым измерениям в том случае, когда эта оценка строится как линейная комбинация измерений. Найдены коэффициенты линейной формы, обеспечивающие несмещенность оценки и ее эффективность. Показано, что во всех случаях точность полученной оценки, характеризуемая дисперсией ошибки оценки, выше точности каждого из измерений. Таким образом, при формировании оценки целесообразным является использование даже показаний грубого датчика, поскольку они увеличивают точность оценки.

### Список литературы

1. Носков В. П., Рубцов И. В., Романов А. Ю. Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальномера // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 8. С. 2–5.
2. Зенкевич С. Л., Минин А. А. Построение карты мобильным роботом, оснащенным лазерным дальномером, методом рекуррентной фильтрации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 8. С. 5–12.

**В. В. Яшунский**, аспирант,  
Московский государственный институт  
радиотехники, электроники и автоматики  
(технический университет),  
vladimir.yashunsky@gmail.com

## Разработка и исследование алгоритмов обработки изображения для системы технического зрения на основе фокусировки

*Рассматриваются типы используемых в робототехнике систем технического зрения, выделяется область, в которой применение системы технического зрения на основе фокусировки является предпочтительной по сравнению с другими методами. Описывается аппаратная часть испытательного стенда и подход к построению алгоритма определения расстояний на основе обработки изображений.*

**Ключевые слова:** система технического зрения, фокусировка

### Обзор систем технического зрения

Системы технического зрения являются важной составляющей информационного оснащения различных типов роботов, ориентированных на решение сложных прикладных задач в условиях неопределенности в автономном режиме. В условиях ограничений по габаритным размерам, накладываемых конструктивными особенностями малогабаритных мобильных роботов, важно обеспечить получение наиболее полной информации с минимального числа устройств.

Система технического зрения способна оказать решающий вклад в решение широкого круга задач, таких как локальная навигация, сбор разведывательных данных, мониторинг территории, визуальный контроль манипулирования объектами и многих других.

На данный момент основными используемыми методами оптической дальнометрии являются лазерная дальнометрия, использование источника структурированного освещения и метод стереопары (параллакса).

Лидары (LIDAR — Ligth Identification, Detection and Ranging) — устройства, использующие технологию получения информации о расстоянии до объектов с помощью активных оптических систем. Принцип действия лидара схож с радаром: направленный луч источника излучения отражается от целей, возвращается к источнику и улавливается высокочувствительным приемником, при этом время отклика прямо пропорционально расстоянию до цели. Современные лидары, используемые в робототехнике, обладают высокой точностью (погрешность в пределах 2 см на расстоянии до

50...120 м в зависимости от угла наклона сканируемой поверхности) [1], но обладают значительными габаритными размерами (высота — около 25 см, диаметр — около 20 см) и высокой стоимостью, порядка 75 000 [2]. Также их недостатком можно считать активность оптической системы: непрерывное панорамное сканирование лазерным лучом является мощным демаскирующим фактором, что неприемлемо в случае, если местоположение робота необходимо скрыть.

При использовании источника структурированного освещения также проводится активное оптическое воздействие на обстановку. Идея заключается в проецировании световой картины известной структуры (например линии) на окружающие объекты. По искажениям отображения линии на полученном изображении можно судить о форме этих объектов. Реализация этого метода возможна на дешевых компонентах, а габаритные размеры принимающей и передающей систем незначительны. Однако подобные устройства очень чувствительны к внешним источникам света и, показывая хорошие результаты в темных помещениях, оказываются беспомощными при ярком солнечном свете.

Стереопара моделирует бинокулярное зрение. Использование двух разнесенных видеокамер позволяет определить расстояние до объекта в случае, если его удалось локализовать на обоих снимках. Расчет выполняется на основании пеленга точки для каждой из камер и длины "базы" (расстояние между камерами) [3]. Этого достаточно для построения треугольника и определения расстояния до объекта. Сложность создает то, что увеличение базы, необходимое для повышения точности, плохо сочетается с задачей минимизации габаритных размеров.

Метод параллакса отличается от стереопары лишь тем, что снимки получаются с одной и той же камеры, но при ее положении в различных местах [4]. Таким образом, можно создать "базу" желаемого размера и последовательно отслеживать изменения положения точек на снимке в процессе смены дислокации, таким образом определяя положение одних и тех же элементов на начальных и конечных снимках. Недостатком данного метода является необходимость в физическом перемещении камеры (неподвижный робот не может определить расстояние для чего бы то ни было). При этом длина этого вектора перемещения должны быть определена с достаточной точностью для достижения хороших результатов в определении расстояния, так как значение длины "базы" является единственной заданной линейной величиной. Также сложной алгоритмической задачей как для метода стереопары, так и для метода параллакса является поиск одноименных точек на двух снимках.

### Описание алгоритма

Метод определения расстояния до объекта на основе анализа степени его размытости на изобра-

жении (в англоязычной литературе используется термин DFF — Depth From Focus) [5] заключается в следующем: у любого объектива есть глубина резкости, которая определяет расстояние между ближней  $L_1$  и дальней  $L_2$  границами фокусировки:

$$L_1 = \frac{Df^2}{f^2 + (D-f)Fc}; \quad (1)$$

$$L_2 = \frac{Df^2}{f^2 - (D-f)Fc}, \quad (2)$$

где  $f$  — фокусное расстояние объектива,  $D$  — расстояние фокусировки,  $F$  — диафрагменное число,  $c$  — минимальный кружок рассеяния (определяемый исходя из параметров матрицы).

При нахождении в пределах этих границ объект на изображении будет резким, а при выходе за эти границы изображение начинает размываться. Таким образом, если сделать серию фотоснимков с минимальной глубиной резкости, изменяя расстояние фокусировки от минимума до бесконечности, можно выявить, на каком из кадров объект был максимально резким, и, следовательно, определить расстояние до него. Характерной особенностью метода является возможность проводить сканирование с одной точки без активного воздействия на окружающий мир. Кроме того, цена конечного аппаратно-программного комплекса ожидается существенно ниже цены лидаров, а размеры должны оказаться достаточно компактными (порядка 10—15 см по наибольшему габаритному размеру).

Требования, предъявляемые методом к аппаратной части, в первую очередь, относятся к оптике. Для минимизации значения глубины резкости требуются объективы с малым значением числа диафрагмы, а также (так как число диафрагмы — относительная величина) с большим диаметром внешней линзы. Таким требованиям удовлетворяют "портретные" фотообъективы (например объектив Nikkor F1.4 AF, фокусное расстояние — 50 мм, диаметр светофильтра — 52 мм, число диафрагмы — 1.4). На аппарате уровня необходима возможность изменять расстояние фокусировки. Так как обработка данных предполагает определение характеристических параметров множества независимых точек, представляется разумным использование распараллеленных вычислений, например на базе ПЛИС.

Определение расстояния по методу DFF возможно только для контрастных точек поверхностей, т. е. достаточно сильно отличающихся от соседних по цвету. Следовательно, прежде чем вычислять расстояния, необходимо определиться с набором тех точек, для которых это в принципе возможно

в рамках применяемого метода. Подобная "карта контрастности" может быть составлена как чисто программным, так и аппаратно-программным методом. В первом случае необходимо проанализировать все имеющиеся снимки и выделить те точки, контрастность которых хотя бы на одном из снимков превышает определенный порог. Во втором случае необходимо дополнительно сделать снимок с максимально закрытой диафрагмой и, таким образом, получить одно изображение с глубокой резкости, покрывающей всю обследуемую область. Использование снимком как с открытой, так и с закрытой диафрагмой может быть полезным при дистанционном управлении роботом, так как полностью резкое изображение обладает большей информативностью с точки зрения оператора, однако закрытая диафрагма требует большего времени экспозиции, что может существенно снизить скорость съема информации в условиях недостаточной освещенности. Например, при съемках в помещении, освещенном лампами дневного света, необходимая выдержка при диафрагме F(1.4) составляла 50...100 мс, в то время как при максимально закрытой диафрагме требуемая выдержка возросла до 1...2 с. Результаты экспериментальных исследований показали, для обрабатываемого снимка размером 800 на 600 точек лишь для 5000...20 000 из их (в зависимости от характера сцены) максимальное значение контраста превышает порог шума, т. е. лишь для 1...5 % точек имеет смысл проводить анализ формы кривой зависимости контрастности от расстояния фокусировки для определения расстояния до них.

### Экспериментальные исследования

Для экспериментального апробирования разрабатываемого метода был создан стенд на основе фотоаппарата Nikon D50 и объектива Nikkor F1.4 AF,



Рис. 1. Изображения сцены, полученные с разным значением расстояния фокусировки

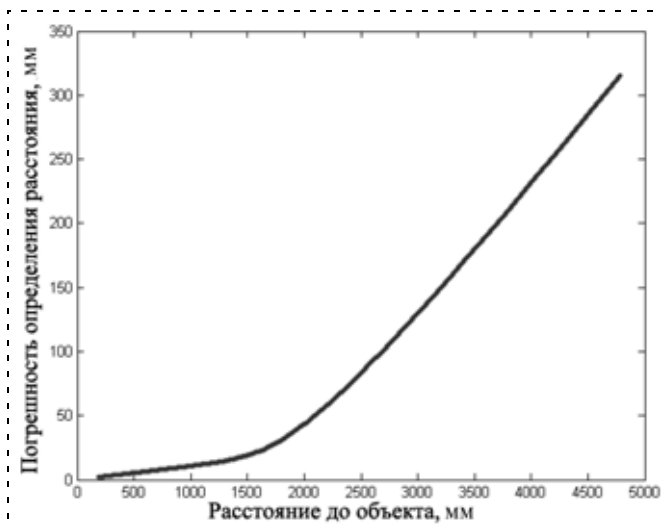


Рис. 2. Зависимость погрешности определения расстояния от расстояния до объекта

позволяющего получать снимки с приемлемой глубиной резкости (рис. 1).

Управление расстоянием фокусировки объекта осуществляется шаговым двигателем MOT003 под управлением контроллера Stepper Vee производства компании PC Control Ltd. Поворот вала двигателя передается через фрикционную передачу на управляющее кольцо объектива, обеспечивая 500 шагов на диапазоне изменения расстояния фокусировки от нуля до бесконечности.

Проведенная калибровка показала, что зависимость расстояния фокусировки от угла поворота управляющего кольца носит экспоненциальный характер и с точностью 95 % описывается уравнением

$$f(x) = ae^{bx} + ce^{dx} \quad (3)$$

при значении коэффициентов  $a = 19,14$ ;  $b = 0,01069$ ;  $c = = 2,058 \cdot 10^{-9}$ ;  $d = 0,11$ .

Так как расстояние до объекта принимается равным расстоянию фокусировки одного из кадров, то минимальная возможная погрешность метода определяется разницей этих расстояний для двух соседних кадров (рис. 2).

Как видно, значение погрешности резко увеличивается с увеличением расстояния до объекта.

В работе [6] Флеминг продемонстрировал характерные формы пиков для точек в зависимости от их положения относительно границы цветов. Характерной особенностью формы кривой

для точки, лежащей строго на границе цветов, является наличие одного пика с центром, приходящимся на фокусировочное расстояние, равное реальному расстоянию от камеры до точки. Характерные особенности формы кривой для точек, лежащих на расстоянии от границы цветов — два пика, расположенные симметрично относительно фокусировочного расстояния, равного реальному расстоянию до точки. На практике кривая сильно зашумлена и выявление ее формы становится неочевидной задачей.

Один из возможных вариантов определения формы кривой — аппроксимация экспериментальных данных гладкой кривой, например, гауссианой первого порядка. Аппроксимация позволяет определить интересующий нас параметр (расстояние от камеры для точки) для обоих описанных выше случаев как точку, в которой расположен центр гауссианы (рис. 3). Однако такой подход ничего не говорит о надежности полученного результата, так как аппроксимировать гауссианой можно любую последовательность точек.

Простейший способ ввести критерий достоверности точки — посчитать отношение максимального значения к среднему. Тогда наличие ярко выраженных пиков будет выражаться в высоких значениях этого отношения.

К сожалению, экспериментально было установлено, что этого недостаточно. Встречаются точки,

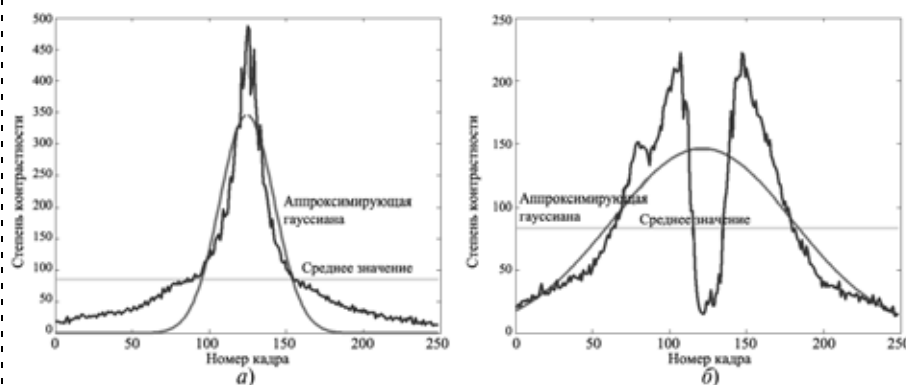


Рис. 3. Анализ данных для точки, лежащей на границе цветов (а) и на расстоянии от этой границы (б)

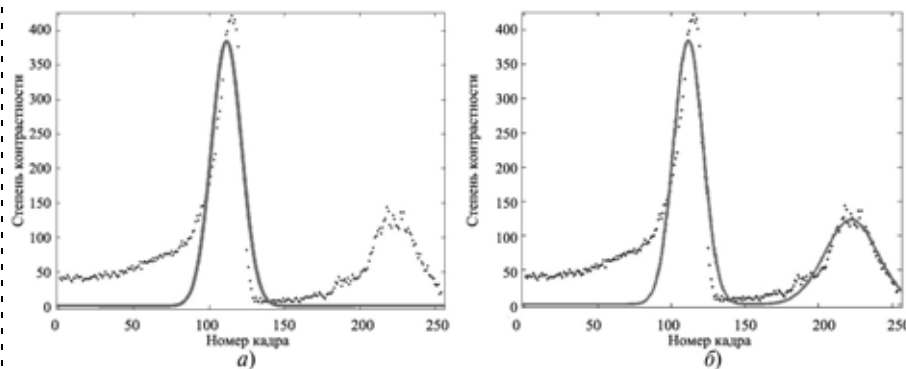


Рис. 4. Аппроксимация данных с помощью гауссианы первого (а) и второго (б) порядков

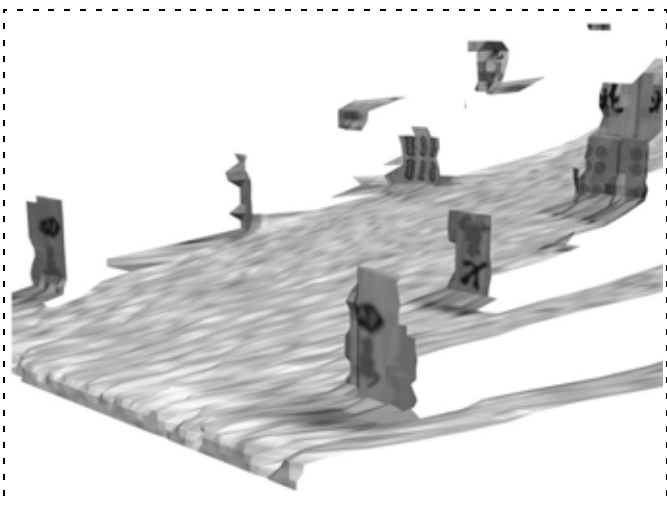


Рис. 5. Пример построения итоговой поверхности

у которых форма кривой сильно не соответствует ни одной из двух "эталонных". Такая ситуация может быть вызвана, например, попаданием в кадр источника света (эффект проявляется на границе засветки). В этом случае аппроксимация гауссианой первого порядка выявляет первый пик (не соответствующий реальному положению объекта), а отношения максимума к среднему значению создает иллюзию достоверного результата (рис. 4, а).

Определить "неправильность" формы возможно, аппроксимируя данные гауссианой второго порядка (рис. 4, б). Значения матожидания и дисперсии каждой из гауссиан позволяют более точно определить положение и соотношение размеров двух пиков, таким образом разделяя соответствие или несоответствие эталонной форме сигнала (рис. 4, б).

Вычисленное расстояние до точек, для которых это возможно с применением предложенного подхода, позволяет в дальнейшем интерполировать полученные результаты для остальных точек и построить единую поверхность (рис. 5).

Таким образом, развитие предлагаемого подхода открывает широкие перспективы для построения систем локальной навигации мобильных роботов, сбора данных и визуального контроля при манипулировании объектами на базе системы технического зрения, построенной с использованием эффекта фокусировки.

#### Список литературы

1. <http://www.velodyne.com/lidar/>
2. <http://scivestor.com/insight/?p=373>
3. **Фу, Гисалес, Ли.** Робототехника. М.: Мир, 1989.
4. **Хорн Б. К. П.** Зрение роботов. М.: Мир, 1989.
5. **Chaudhuri S., Rajagopalan A.** Depth from defocus: a real aperture imaging approach. Springer Verlag, 1999.
6. **Eleming J. W.** A Real-Time Three Dimensional Profiling Depth From Focus Method. MIT, 1994.

*Информация*

18—20 октября 2010 г. в Москве в ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН  
состоится 2-я Российская конференция с международным участием

## "Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения" (УКИ-10)

Председатель Программного комитета — академик РАН С. Н. Васильев

#### Тематика конференции

- ♦ Теория, методы исследования и проектирования, опыт применения технических средств (от датчиков до исполнительных механизмов), основанных на различных физических и схмотехнических принципах.
- ♦ Теория, алгоритмы и программное обеспечение систем УКИ.
- ♦ Анализ состояния, тенденций и перспектив развития систем УКИ.
- ♦ Дискретно-событийные модели в системах УКИ, включая сетцентрические, логические, на основе размытой логики, сети Петри и др.
- ♦ Создание средств систем УКИ на основе новых технологий (микро- и наноэлектромеханических и оптоэлектромеханических систем, биомикросистем, беспроводной связи и других).
- ♦ Компьютерное и физическое моделирование технических и программных средств систем УКИ.
- ♦ Многопроцессорные и многомашинные системы как средства систем УКИ, их структуры, отказоустойчивость, диагностируемость.
- ♦ Теоретические и прикладные аспекты повышения и оценивания качества средств систем УКИ (точности, быстродействия, надежности, отказоустойчивости, живучести, диагностируемости, интеллектуальности и т. д.), метрологическое обеспечение создания и применения средств УКИ, их испытания и сертификация.
- ♦ Методы проектирования технических и программных средств систем УКИ для работы в экстремальных условиях и применения в специфических областях (атомная энергетика, оборона, космос, транспорт, медицина, горнодобывающая промышленность, окружающая среда и др.)
- ♦ Исследования и разработка технических и программных средств встроенных, сетевых, проблемно-ориентированных систем УКИ.
- ♦ Вопросы обучения в области средств УКИ.

Официальный сайт конференции: <http://cmm.ipu.ru>

Сайт регистрации и подачи докладов: <http://cmm-conf.ru>

Электронный адрес конференции: [cmm-conf@mail.ru](mailto:cmm-conf@mail.ru), [ambar@ipu.ru](mailto:ambar@ipu.ru)

**Издательство "Новые технологии" начинает выпускать теоретический  
и прикладной научно-технический журнал**

## **ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ**



*В журнале будут освещаться состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваться достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.*

### **Основные тематические направления журнала**

- ◆ Общетеоретические вопросы программной инженерии
- ◆ Языки и системы программирования, семантика программ
- ◆ Инструменты и методы программной инженерии
- ◆ Модели, методы и алгоритмы проектирования программных систем
- ◆ Системы управления базами данных и знаний
- ◆ Модели, методы, алгоритмы и программные инструменты для организации взаимодействия программ и программных систем
- ◆ Человеко-машинные интерфейсы, средства визуализации, обработки изображений, системы виртуальной реальности, мультимедийного общения
- ◆ Модели и методы создания программных систем для параллельной и распределенной обработки данных
- ◆ Верификация и тестирование программного обеспечения
- ◆ Оценка качества, стандартизация и сопровождение программных систем
- ◆ Безопасность программно-информационных систем
- ◆ Модели жизненного цикла программных проектов
- ◆ Сопровождение программного обеспечения
- ◆ Управление программной инженерией
- ◆ Интеллектуальные программные комплексы и системы
- ◆ Создание и эксплуатация прикладных программно-информационных систем

***Журнал распространяется только по подписке.***

***Оформить подписку можно через подписные Агентства  
или непосредственно в редакции журнала.***

Подписные индексы по каталогам:

"Роспечать" — 22765; "Пресса России" — 39795.

**Адрес редакции для авторов и подписчиков**

✉ 107076, г. Москва, Стромьинский пер., 4

Издательство "Новые технологии"

Редакция журнала "Программная инженерия"

☎ Телефоны: (499) 269-55-10; 269-53-97    📠 Факс: (499) 269-55-10

✉ E-mail: prin@novtex.ru

# CONTENTS

- Tsykunov A. M.** Robust Control of One Class of Non Minimum-phase Plants with Compensation of the Bounded Disturbances . . . . . 2
- The task of designing of algorithmic maintenance robust control systems for the non minimum-phase plant subject to action of external disturbances is solved. The class of plants for which the principle of construction of the control system compensating parametrical and external bounded disturbances with required accuracy is offered is allocated.*
- Keywords:** robust control, non minimum-phase plant, the polynomials equation, reference influence, parametrical and external disturbances
- Cheburakhin I. F., Tsurkov V. I.** Special Relational Database for Optimization and Automations of the Syntheses Combinational Automaton . . . . . 7
- Methods are offered for optimization and automations of the syntheses combinational automaton on base structured-functional consequent (parallel) to decompositions boolean function, as well as — on base of the functional equations. Herewith estimations are received for factors quality syntheses in different base: number symbol variable in assigning function to formula; the number base subroutine and depth of the formula; the number functional element and depth of the circuit, forming relational database. Some got estimations of the factors quality-difficulties of the syntheses, presenting practical interest, minimum.*
- Keywords:** boolean function, syntheses formula and circuit, decomposition, difficulty, factors quality, minimization, functional and difference of the equation, multicriteria optimization, relational database
- Aliyev T. A., Musayeva N. F., Quluyev Q. A., Sattarova U. E.** Noise Technology of Indication and Identification of the Latent Period of Transition of an Object from a Normal Condition to an Emergency One . . . . . 13
- Difficulties of detecting by the control system of an initial stage of transition of an object from a normal condition to an emergency one are analyzed. Various variants of correlation noise technologies for reliable indication of an initial stage of the origin of defects for cases when they manifest themselves by noises of signals received from appropriate sensors are suggested. Consideration is given to an opportunity of identifying a place and character of transition of many-dimensional controlled objects from normal condition to an emergency one by means of matrices which are formed from various reliable noise indicators.*
- Keywords:** random signal, interference, noisy signal, indicator, technical state, object, control
- Loginov A V., Poduraev Yu. V., Harzbecker H., Ihlenfeldt S.** Dynamics of Multi-Axis Machining Centers with Hybrid Kinematic Structures. . . . . 19
- The paper examines features of kinematics and direct dynamics solution for a new class of machine tools with hybrid serial-parallel kinematic structures. Such linkage schemes are distinguished by the presence of redundant degrees of freedom and redundant actuators. The proposed method of dynamics modeling is applied to Dynapod milling center specially designed for large-size workpieces machining.*
- Keywords:** parallel and hybrid kinematic structures, actuation and kinematic types of redundancy, stabilization of direct dynamics solution
- Klevalin V. A., Polivanov A. Yu.** Machine Vision Systems in Industrial Robotics . . . . . 26
- Features of functioning of machine vision systems in industrial robotics are considered. The requirements shown to machine vision systems on accuracy, speed are certain, to reliability of recognition and reliability proceeding from requirements of technological operations, such as assembly, service of metal-cutting machine tools, etc. It is shown, that at binary machine vision system application one-line hardware processing of the information that increases speed of machine vision systems in 3.5 times in comparison with raster coding is expedient. The technique of designing of machine vision systems, and also methods of increase of accuracy of item management by iterative manipulators by means of machine vision systems is presented.*
- Keywords:** industrial robot, precision, reliability, control, information, identification
- Evstafieva S. V., Molodtsov V. V.** Simulation Tracking Feed Drive for Modern Machine-Tools with CNC . . . . . 37
- The article investigated problem of modeling feed drives for modern machine-tools in the beginning of projecting stage. Authors proposes simple model of dynamical system for typical complete drive, which with satisfactory fit of accuracy imitate processes in its electromechanical part. Researched the effect, of information lag during the information transfer in the control system on the dynamical characteristics of the drive.*
- Keywords:** tracking drive, controlled drive, position regulator, speed regulator, current regulator, dependent regulation, feedback, PI-regulator, LACHH, LFC, transient process, robustness, information lag, linear model, brushless motor, direct current motor, mechatronics
- Ermolov I. L., Nikitin V. N., Sobolnikov S. A.** Interactive Simulator with Adaptation Components for Training of Mobile Robots' Operators. . . . . 45

The efficiency of ergatic system "robot – human-operator" depends drastically on quality of operator's training. Simulators used for such training are especially required to bear adequacy towards real robot and environment. This paper presents a new type of simulator capable to adapt to actual specimen of mobile robot.

**Keywords:** operator training, training simulator, UGVs

**Zarudnev A. S., Ilyukhin Yu. V.** On the Improvement of Laser Cutting Machines Productivity by Evaluation of Planimetric Error . . . . . 52

This paper presents an approach to construction and control logic of high-speed laser cutting machines movement control systems based on the principles of mechatronics and dependencies that enables evaluation of planimetric error and assignment of cutting speeds on segmented trajectory with respect to technological requirements.

**Keywords:** laser cutting, laser complexes, productivity, planimetric accuracy, mechatronics

**Dunin-Barkovsky I. I., Poduraev Ju. V.** Modern Optomechatronic Systems for 3D Visual Objects' Inspections . . . 57

This paper discusses application of precise and high-speed mechatronic systems for 3D visual control in electronics production. It studies mechatronic visual control systems, their structure, basic characteristics. Some examples of mechatronic visual control systems applications in electronics production are presented.

**Keywords:** optomechatronic systems, automatic visual control systems, active machine vision systems

**Gribkov A. A.** An Improvement of Accuracy and Productivity of Automated Weight Batching Systems . . . . . 61

The author examines a problem of improvement of accuracy and productivity of automated weight batching systems. Stage-by-stage batching is used as a base technology for decision of the declared problem. Within framework of the problem decision a stage-by-stage dozer is considered and stage-by-stage batching modes optimization algorithms are offered.

**Keywords:** materials batching, optimization, batching mode, productivity

**Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Mursalimov E. Sh.** The Features of MatLab Using for Visual Simulation of Multilink Manipulator Movement . . . . . 66

This paper is dedicated to development of integration method of MatLab and external program for visualization of multilink manipulator movement in order to create the simulating complex for investigation of their control systems. It is offered to use the UDP protocol for data transmitting between MatLab and external program. But in this case we must solve the synchronization task for calculation processes of MatLab and external program. In this paper the algorithm of automatic synchronization of above-noted processes is offered. This algorithm is based on using of methods of automatic control theory. Carried out calculation experiments completely confirm the workability and efficiency of offered approach.

**Keywords:** simulation, synchronization, MatLab, multilink manipulators, visualization, control systems

**Zenkevich S. L., Nazarova A. V.** Combining Sensor Systems Data . . . . . 71

The problem of estimating of scalar parameter, measured by different sensors, is discussed. The optimal estimation is derived, and it is shown, that this estimation is more precise than each of measurements of scalar parameter. The example is demonstrated.

**Keywords:** sensors, measurement, parameter estimation

**Yashunskiy V.D.** The Development and Research of Data Transform Algorithm for System of Technical Sight on Base of the Focussing . . . . . 74

The article tells about different computer vision methods, used in robotics. It is demonstrated, there is an implementation area, where the use of a DFF system is preferable. The used hardware and a way of algorithm implementation are described.

**Keywords:** computer vision, curve fitting, depth from focus and defocus

---

---

**Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

**107076, Москва, Стромьинский пер., 4**

**Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *О. А. Ефремова.* Корректор *Е. В. Комиссарова.*

---

Сдано в набор 01.07.2010. Подписано в печать 03.08.2010. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 10,94. Заказ 649. Цена договорная.

---

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15